

QIANMI DIREJING
SHIGONG JISHU

千米地热井 施工技术

刘志国 等编著



黄河水利出版社

责任编辑 吉岭青
封面设计 何 颖
责任校对 刘红梅
责任监制 常红昕

ISBN 7-80621-833-5



9 787806 218334 >

ISBN 7-80621-833-5/TK · 6

定 价：15.00 元

千米地热井施工技术

刘志国 刘新丽 刘丕新 王现国 编著

黄河水利出版社

图书在版编目(CIP)数据

千米地热井施工技术 / 刘志国等编著. — 郑州:
黄河水利出版社, 2004.10
ISBN 7-80621-833-5

I. 千… II. 刘… III. 地热井—施工技术
IV. TK521

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 098566 号

策划编辑: 王路平 电话: 0371-6022212 E-mail: wlp@yrp.com

出版社: 黄河水利出版社

地址: 河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码: 450003

发行单位: 黄河水利出版社

发行部电话及传真: 0371-6022620

E-mail: yrpc@public.zz.ha.cn

承印单位: 黄河水利委员会印刷厂

开本: 850 mm × 1 168 mm 1 / 32

印张: 6.375

字数: 160 千字

印数: 1—2 000

版次: 2004 年 10 月第 1 版

印次: 2004 年 10 月第 1 次印刷

书号: ISBN 7-80621-833-5 / TK · 6

定价: 15.00 元

序

改革开放以来，随着经济的高速增长，我国已成为世界上第三大石油消费国，已由过去的石油净出口国成为了世界上第二大石油进口国。近两年来，在许多地区和大城市又出现了电力紧张的情况。面临石油短缺和电力的供不应求，我们必须寻找和开发新能源，其中地热资源就被誉为非枯竭性能源。

地球是一个庞大的天然热库，蕴藏着巨大的热能。其热量源自深部岩浆和岩石中放射性元素衰变释放的能量和板块相互碰撞、错动产生的摩擦热。当地热能封闭在距地表较近的距离并可开采利用时，就成为了地热能源。如果按平均垂直地热梯度 $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 估算，世界范围内陆地 3 km 深度以内储存的热量相当于近亿吨石油，其中约 20% 的热量储藏在地下流体中，约 80% 储藏在地下岩石中。迄今，世界上已形成了新兴的“地热工业”。我国也已发现地热点 3 000 余处，各省市区几乎都有地热资源。

目前，钻探（井）仍是勘探与开发地热资源的惟一手段。天津、北京、西安等城市及福建、山东、河南、广东等省正兴起钻井的热潮。例如，中原地区 1 km 深度左右分布着许多沉降盆地构造断裂地热田，地下水具有多层、承压、水量稳定的特点。近十几年来，郑州、开封、新乡等地市均钻成了深达千米以上的地热井，取得了重大的经济效益和社会效益，这其中就包含了刘志国同志的辛勤劳动与聪明才智。

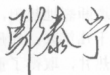
刘志国曾是我的学生。1986 年暑假我带他们班同学赴河南桐柏山区进行钻探实习的情景还历历在目。“士别三日当刮目相看”，

当年的班干部，今天已成长为河南省地质工程公司的党委书记、高级工程师、建筑施工企业一级项目经理、优秀科技模范带头人。他长期从事水文水井及地热井的施工与技术管理工作，积累了丰富的经验。

刘志国同志具有强烈的事业心，不仅在技术和行政工作中精益求精，而且坚持边工作边攻读硕士学位，不断提高自己。2004年5月，我作为他研究生论文答辩委员会的主席，亲自审阅了他的硕士论文，并聆听了他的论文答辩。他题为“中原地区千米地热井施工技术”的论文洋洋十余万字，在分析中原地区千米地热井施工现状的基础上，指出了其技术工艺方面的不足；结合中原地区地层情况，吸取成熟的石油钻井技术、成井工艺，理论联系实际地提出了中原地区地热深井施工的技术工艺，具有创新性和实用性。论文层次清晰，资料翔实，图文并茂，逻辑合理，结论可信。评委们一致认为，这是一篇几乎可以作为地热钻井“参考手册”的优秀论文。

“长江后浪推前浪”，老师为学生在地热钻井领域取得的非凡成就感到高兴。值此《千米地热井施工技术》一书出版之际，我要感谢刘志国、刘新丽伉俪为繁荣钻探（井）工程学科付出的辛勤劳动，希望他们在事业上继续“求索”，“欲穷千里目，更上一层楼”。

政府特殊津贴获得者、教授、博士生导师



2004年7月于中国地质大学(武汉)

前 言

地热能源是 21 世纪大力推广的绿色能源，它的开发利用必将推动地热钻井技术的进一步发展。在地热开发利用上，许多新工艺、新方法、新技术将不断涌现。本书试图对现有地热井施工过程中存在的不足，经过从设备配置入手，结合国产化情况，提出了采用牙轮钻头，合理配置钻柱，选择泵压、泵量以及钻井液的不同特性，来提高地热钻井速度，确保钻井质量，提出了“地热开发钻井是基础、成井是关键”的思路。成井过程设计流程明确，环节要求严格，既有对过去技术经验的总结，也有对未来技术的展望，更注重现有的实用性。事故处理方面借鉴或引进了石油钻井事故处理的方法，达到快速、有效。

技术展望，提出了现阶段所应推广使用的气举反循环钻井技术，以及未来钻井技术的难点及技术保障，对于地热钻井技术将来的发展作了较好的预测。科学打钻将深入人心，并随着多学科技术的发展，将得到全面推广。

总结本书有以下特点：

(1) 针对中原地区千米地热井施工存在的技术问题，经过理论与实践的分析，综合采用了地质与石油钻探的技术优势，二者充分结合用于地热井施工。

(2) 针对地热井施工特点，经过理论与实践的检验，在设备选用上以轻便、快速为原则；经过大量的实践及理论研究，确定以新的牙轮钻头为主要破岩工具。

(3) 着重介绍了实现快速钻井的方法选择，提出了钻井参数由模拟石油钻井向石油钻井参数发展的新思路。特别提出了钻具

配置趋向于大直径系列, 钻压控制在 $80 \sim 150 \text{ kN}$ 范围内, 泥浆泵以高泵压大排量为主; 通过钻井液流变参数调整实现钻井的“快速”, 确保井内的“安全”。

(4) 在理论与实践经验的指导下, 筛选出了一套对于地热钻井和成井具有重要指导意义的公式或模型, 以便在实际工作中使用。

(5) 在成井技术方法上有创新, 如常温贴砾管技术、非填砾技术、遇水膨胀橡胶技术等, 把新工艺、新材料用于实际生产, 具有重大的指导意义。

(6) 在事故处理方法上, 综合地质钻探和水文水井钻探技术, 引进了石油钻井事故的概念及方法, 达到快速有效。

(7) 提出了未来地热井施工斜井的观点, 突破了传统地热水井打直井的思维定势。同时对地热井处理提出了独到的见解, 尤其是在侧钻开窗技术及射孔技术等方面。

(8) 对未来技术进行了展望, 倡导现阶段推广使用气举反循环钻井技术, 同时积极倡导复合钻井技术(冲击+螺杆等一体化), 实现钻井的科学化、智能化。

在本书出版之际, 要特别感谢中国地质大学(武汉)的乌效鸣教授、张晓西教授等老师一直给予多方面的关心和支持。鄢泰宁教授细心审阅书中的一些重要章节, 提出了许多宝贵意见, 并为本书作序, 在此一并表示衷心的感谢。

由于地热钻探(井)涉及的专业知识面很广, 而作者的阅历有限, 因此书中肯定会存在不少欠缺或不妥之处, 希望读者批评指正。

作者

2004年9月

目 录

序	郝泰宁
前 言	
第一章 地热工程概况	(1)
第一节 地热——绿色能源	(1)
一、地热资源	(1)
二、地热能利用与展望	(4)
三、国内外地热勘察技术	(13)
第二节 中原地区地热概况	(20)
一、千米范围内的地热情况	(20)
二、中原地区千米井施工状况	(21)
第二章 设备配置及施工布置	(23)
第一节 设备选择	(23)
一、设备选择的原则	(23)
二、钻机的选择	(23)
三、泥浆泵的选择	(24)
四、钻塔及动力选择	(26)
第二节 施工布置	(28)
一、地基承载力计算	(28)
二、施工布局	(31)
三、设备的拆、迁、安和运输	(31)
第三章 钻井工艺	(33)
第一节 钻孔结构	(34)

一、钻孔结构选择原则	(34)
二、常用的钻孔结构	(34)
三、钻孔直径的选择与水量的关系	(35)
第二节 钻进方法	(35)
一、钻头的选择与使用	(36)
二、受力分析与设计	(41)
三、钻进参数选择	(68)
第三节 钻井液	(84)
一、钻井液的性能	(84)
二、钻井液的配制	(90)
三、钻井液固相控制	(95)
四、防漏与堵漏	(101)
第四节 直井防斜技术	(105)
一、井斜原因	(105)
二、防斜钻具	(106)
第四章 成井工艺	(109)
第一节 成井工艺选择	(109)
一、成井工艺流程选择	(109)
二、地球物理测井	(110)
三、取水段选择	(112)
第二节 通孔与破壁	(113)
一、通孔(井)	(113)
二、破壁	(113)
第三节 井管安装	(114)
一、井管受力与质量选择	(115)
二、井管结构及下入方法	(117)
三、井管的连接	(120)
四、下管注意事项	(121)

(040) 第四节 冲孔换浆.....	(122)
(040) 一、换浆目的.....	(122)
(040) 二、换浆方法.....	(123)
(040) 第五节 过滤器选择.....	(126)
(040) 一、过滤器型号选择.....	(127)
(040) 二、过滤器参数配置.....	(131)
(040) 第六节 填砾.....	(133)
(040) 一、砾料的选择.....	(134)
(040) 二、填砾厚度及数量.....	(134)
(040) 三、填砾方法.....	(135)
(040) 四、非填砾技术.....	(136)
(040) 第七节 止水与固井.....	(136)
(040) 一、止水.....	(136)
(040) 二、固井.....	(139)
(040) 第八节 洗井及抽水试验.....	(140)
(040) 一、洗井.....	(140)
(040) 二、抽水试验.....	(142)
(040) 三、资料整理.....	(143)
第五章 常见事故的处理.....	(144)
(040) 第一节 钻具事故及处理.....	(144)
(040) 一、常见的钻具事故.....	(144)
(040) 二、钻具事故的处理.....	(145)
(040) 第二节 落物事故及处理.....	(148)
(040) 一、常见的落物事故.....	(148)
(040) 二、落物事故的处理.....	(149)
(040) 第三节 卡钻事故及处理.....	(152)
(040) 一、卡钻的类型、原因及预防.....	(152)
(040) 二、卡钻事故的处理.....	(158)

第四节 成井过程中常见事故及处理	(163)
一、事故及预防	(163)
二、事故的处理	(164)
第六章 旧井修复技术	(166)
第一节 研究对象及仪器	(166)
一、旧井处理研究的对象	(166)
二、旧井处理工程主要检测仪器	(166)
第二节 旧井处理	(170)
一、涌砂井	(170)
二、水量减小	(171)
三、井管破裂	(174)
四、水温降低	(176)
五、落物处理	(176)
六、侧钻成井技术	(176)
第七章 技术展望	(181)
第一节 气举反循环技术的推广应用	(181)
一、气举反循环钻井技术的实现过程	(181)
二、强化地热气举钻井技术	(182)
第二节 钻井技术的发展趋势	(183)
一、钻井学科的特点	(183)
二、钻井技术的发展趋势	(186)
参考文献	(192)

第一章 地热工程概况

第一节 地热——绿色能源

一、地热资源

地球由地壳、地幔和地核组成，它是一个巨大的热库，越往地下温度越高。地热就是指地球内部蕴藏的能量(见图 1-1)，从地球表面往下正常增温梯度是每 1 000 m 增加 $25 \sim 30^{\circ}\text{C}$ ，在地下约 40 km 处温度可达 $1\,200^{\circ}\text{C}$ ，地球中心温度可达 $6\,000^{\circ}\text{C}$ 。由于构造原因，地球表面的热流量分布不均，这就形成了地热异常，如果再具备覆盖层、储层、导热、导水等地质条件，就可以形成地热，从而进行地热资源的开发利用。

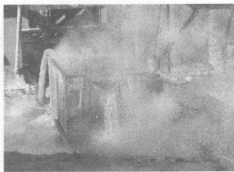
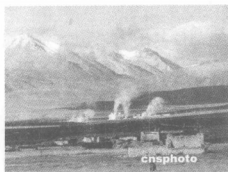


图 1-1 地热能

(一)地热资源

地热资源是指在当前的技术经济条件下，能够科学、合理地

从地壳内开发出来的岩石中的热能和地热流体中的热能量及其伴生的有用组分。

地热资源按其在地下的赋存状态,可以分为水热型、干热型和地压型地热资源,其中水热型地热资源又可进一步划分为蒸汽型和热水型地热资源。

各种类型的地热资源均要通过一定程序的地热地质勘察研究工作才能查明地热资源数量、质量和开采技术条件,以及开发后的地质环境变化情况。目前地热资源勘探的深度可达到地表以下 5 000 m,从技术经济角度分析,其中井深小于 2 000 m 为经济型地热资源,2 000 ~ 5 000 m 为亚经济型地热资源。

(二)生成与分布

地热资源的生成与地球岩石圈板块发生、发展、演化及其相伴的地壳热状态、热历史有着密切的内在联系,特别是与更新世依赖构造应力场、热动力场有着直接的联系。从全球地质构造观点来看,大于 150 °C 的高温地热资源带主要出现在地壳表层的各大板块的边缘,如板块的碰撞带、板块开裂部位和现代裂谷带;小于 150 °C 的中、低温地热资源分布于板块内部的活动断裂带、断陷谷和凹陷盆地地区。

地热资源赋存于一定的地质构造部位,有明显的矿产资源属性,因而对地热资源要实行开发和保护并重的科学原则。

(三)成因类型

根据地热资源成因,我国地热资源分为以下几种类型(见表 1-1):

(1) 现(近)火山型。现(近)火山型地热资源主要分布在台湾大屯火山区和云南西部腾冲火山区。腾冲火山高温地热区是印度与欧亚板块碰撞的产物。台湾大屯火山高温地热区属于太平洋岛弧之一环,是欧亚板块与菲律宾小板块碰撞的产物。在台湾已探到 293 °C 高温地热流体,并在靖水建有装机 3 MW 地热试验电站。

表 1-1 中国地热资源成因类型

成因类型	热储温度	代表性地热田
现(近)火山型	高温	台湾大屯, 云南腾冲热海
岩浆型	高温	西藏羊八井、羊易
断裂型	中温	广东邓屋、东山湖, 福建福州、漳州, 湖南灰汤
断陷盆地型	中低温	京、津、冀、鲁西、昆明、西安、临汾、运城
凹陷盆地型	中低温	四川、贵州等省分布的地热田

(2) 岩浆型。在现代大陆板块碰撞边界附近, 埋藏在地表以下 6~10 km, 隐伏着众多的高温岩浆, 成为高温地热资源的热源。如在我国西藏南部的高温地热田, 均沿雅鲁藏布江即欧亚板块与印度板块的碰撞边界出露, 就是这种成生模式的较典型的代表。西藏羊八井地热田 ZK4002 孔, 在井深 1 500~2 000 m 处发现 329.8℃ 的高温地热流体; 羊易地热田 ZK203 孔, 在井深 380 m 处, 探获 204℃ 高温地热流体。

(3) 断裂型。主要分布在板块内侧基岩隆起区或远离板块边界由断裂形成的断层谷地、山间盆地, 如辽宁、山东、山西、陕西以及福建、广东等。这类地热资源的生成和分布主要受活动性的断裂构造控制, 热田面积一般几平方公里, 甚至小于 1 km²。热储温度以中温为主, 个别也有高温, 单个地热田不大, 但点多、面广。

(4) 断陷、凹陷盆地型。主要分布在板块内部巨型断陷、凹陷盆地之内, 如华北盆地、松辽盆地等。地热资源主要受盆地内部断块、凸块或褶皱隆起控制, 该类地热资源的热储层常常具有多层性、面积状分布的特点, 单个地热田的面积较大, 达几十平方公里, 甚至几百平方公里, 地热资源潜力大, 有很高的开发价

值。

(四)温度分级

根据地热勘察国家标准 GB11615—89, 地热资源按温度分为高温、中温、低温三级, 见表 1-2。

表 1-2 地热资源温度分级

温度分级	温度(t)界限(℃)	主要用途
高温	$t \geq 150$	发电、烘干
中温	$90 \leq t < 150$	工业利用、烘干、发电、制冷
低温	$60 \leq t < 90$	采暖、工艺流程
低温	$40 \leq t < 60$	医疗、洗浴、温室
低温	$25 \leq t < 40$	农业灌溉、养殖、土壤加工

二、地热能利用与展望

地热资源是集热、矿、水三位于一体的清洁而宝贵的矿产资源。世界各国在地热资源开发利用方面, 大都经历了沐浴、医疗、供热采暖和地热发电四个阶段。

地热利用的历史几乎与人类的历史同样久远。明代李时珍在《本草纲目》中就有记载: “温泉主治诸风湿、筋骨挛缩及肌皮顽痹、手足不遂、无眉发、疥、癣诸疾; 在皮肤骨节者, 入浴, 浴讫当大虚惫, 可随与药及饮食补养……”

1904 年, 意大利首次利用 Larderello 地热田的蒸汽发电, 机组容量 15 kW。如果把它看做地热能进入实用能源行列的起点, 那么, 地热能的工业开发利用已走过了百年历程。在最近的 20 多年间有越来越多的国家, 包括工业发达国家和发展中国家, 得到一个共同认识: 地热能资源是可供选择的替代能源。

对于任何一个国家来说，地热是本土资源，对它开发利用的时间、规模和分布容易控制，不必担心卷入运输或主权的争端，而且，地热资源的潜力可以满足国家长期发展的需要。因此，地热资源的开发利用有利于提高国家能源系统的独立性和安全性。

地热能开发利用对环境的有害影响小。地热能作为替代能源不论是用于发电还是直接热利用，都能大幅度削减温室气体排放量，减轻对环境的不利影响。目前，水热型地热热储的开发技术和利用技术是成熟的，设备运行可靠；现代地热电站的可用系数达 95% 或更高。另外，地热能开发利用的技术在不断发展，新的技术发展有望降低地热能的开发费用，增进地热能生产的稳定性和长期性。由此可见，地热能将在 21 世纪可持续发展中占有相当明显的比重。

(一)地热能利用情况

到 20 世纪末，全世界至少有 83 个国家开发利用或有意开发地热资源，约有 50 个国家统计了地热能利用的数量。全世界 1997 年年底的地热发电装机容量为 7 950 MW，分布在表 1-3 所示的 20 个国家。

地热直接热利用已从传统的小型单项利用进展到成规模的工程应用。全世界分布在 38 个国家中的地热直接利用设备热功率为 9 047 MW，最大的利用项目采暖占 33%，沐浴、游泳和医疗等占 19%，温室占 14%，热泵占 12%，养殖占 11%，工业应用占 9%，农产品干燥占 1.5%，融雪占 0.5%，年利用的能量折合 365 万 t 石油当量。今后的开发最有可能在具有下列条件的地方或领域：资源和用户地理配合、热负荷和冷负荷密度高的地方、食物和谷物脱水、气候较冷地区的温室、控制最佳生长养殖、供暖与降温用土壤热源和地下水热泵。根据目前的技术水平，钻井深度 3 000 m 被认为是开发利用地热资源的经济界限。

表 1-3 20 个国家装机容量情况

国 家	装机容量(MW)	国 家	装机容量(MW)
美 国	2 850	冰 岛	51
菲律宾	1 780	肯尼亚	45
墨西哥	743	中 国	32
意大利	742	土耳其	21
日 本	530	俄罗斯	11
印度尼西亚	528	葡萄牙(亚速群岛)	8
新西兰	364	法国(哥德洛普岛)	4
萨尔瓦多	105	阿根廷	0.7
尼加拉瓜	70	澳大利亚	0.4
哥斯达黎加	65	泰 国	0.3

(二)工业发达国家应用示范

冰岛 1997 年的一次能源消耗量为 254 万 t 石油当量, 其中 48% 由地热能供应(水电供应占 17.6%, 依赖进口的石油降低至占 31.9%, 煤占 2.4%), 地热发电量约占全国发电量的 6%, 到 2000 年超过了 15%; 采暖是地热能直接利用最大的项目, 占 77%, 地热采暖的费用只是燃油采暖的 20%~30%, 因地热采暖代替石油采暖(燃油消费已不足 3%), 估计每年节省 1.0 亿美元, 即人均 400 美元; 85% 的住宅采用地热采暖, 首都雷克雅未克几乎全部利用地热水采暖。

美国是地热发电装机容量最多的国家。据美国可再生能源 1996 年度报告的评述, 美国目前在地热发电方面形成了可用系数很高(常常高于 95%)而稳定的电力供应; 在俄勒岗、爱达荷和加利福尼亚等州, 一些地方的地热区域采暖系统已经运行了几十年; Geysers 地热田是美国也是世界上最大的地热发电基地, 以安全、发电成本低和环境影响小而著称, 已有 40 年的历史, 它也是一个现场研究基地。把地热资源以外的水注入热储以维持压力和产量

是 Geysers 地热田在过去 20 年间最大的技术成就。美国在西部 9 个州进行了地热资源(至少 50℃)和社区(位于地热资源 8 km 范围内)配对的研究,鼓励这些社区开发利用地热,现已有 256 个配对社区。

美国地热资源理事会月刊(GRCBULL)1998 年第 6 期的研究与开发专栏介绍了能源部地热工艺处为实现能源部的国家能源系统综合战略,于 1998 年 6 月制定了地热能发展计划策略,能源部的综合战略包括 5 个目标:①改进能源系统的效率;②保证能源系统的可靠性(减少美国经济受石油供应中断影响的薄弱环节,保证能源系统可靠性、灵活性和紧急反应能力);③推动重视卫生与环境价值的能源生产与使用;④扩大未来能源的选择;⑤全球问题(经济、安全、环境)的国际合作。地热工艺处的职责是和地热产业界结成伙伴,致力于把地热作为可持续、环境方面合理、经济上有竞争力的能源,用于国内和世界能源供应。让地热能能在 2010 年以前在全世界优先担负起替代污染能源的重任,这是制定发展计划策略的着眼点。地热能发展计划策略包括 5 个方面的目标:①国内电力生产——到 2010 年,用地热能供应 700 万美国家庭(1 800 万人口)需要的电力,使地热发电成为最受欢迎(经济上和环境上)的电力发展方案;②直接利用和地热热泵——到 2010 年,把地热能直接利用和地热热泵的应用扩大到供应 700 万个家庭需要的采暖、降温和热水;③国际地热开发——到 2010 年,用美国的地热工艺设备在发展中国家至少装备 10 000 MW,以满足发展中国家上亿人口的基本电力需求;④科学与技术——加速地热科学与技术的进步,以保证美国继续为世界地热之先导;⑤未来地热资源——开发新工艺,以满足美国未来非运输能源需求的 10%。达到上述目标将产生如下的累积效益:刺激国内 610 亿美元投资于所有的地热设施,获得国外地热发电投资 160 亿美元的市场,在美国产生 160 万人的新就业机会,削减美国二氧化碳排

放量 8 000 万 t~1 亿 t 碳(80~100 MMTC), 削减全球二氧化碳排放量 190~230 MMTC, 联邦土地上的地热工程向政府缴纳的矿产资源使用费增加 1.8 亿美元。

日本的地热开发利用是“阳光计划”的一部分。根据日本地热协会 1997 年度报告, 1996 年财政年度末的地热发电装机容量为 530 MW; 计划 2010 年的目标总装机容量达 2 800 MW。地热的开发研究活跃, 正在进行的研究项目有推进地热开发的普查、小型双循环发电示范试验、裂隙型热储勘探方法的开发、深层热储的调查、开发 10 MW 双循环示范电站、地热井 MW 级系统的开发、干热岩发电系统的开发、深层热储钻井与生产工艺的开发、环境调查。在日本有 2 600 多座温泉, 全国仅温泉旅馆就有 7.5 万家。

新西兰是世界上首先利用以液体水为主的汽水混合地热流体发电的国家。Wairakei 电站的第一台机组于 1958 年年底投入运行。世界上利用地热能的另一最大工业用户是 Tasman 纸浆和造纸厂, 利用 Kawerau 地热电站双循环机组排出的 170 °C 地热水, 通过蒸发器产生洁净汽用于处理木柴、蒸制纸浆和造纸烘干。新西兰将地热资源与其他矿产资源同土地、空气、森林、生态、水资源环境及自然景观资源等一起实施管理, 资源开发和环境保护紧密结合。

法国在过去的 30 年中特别注重发展低温地热能用于区域采暖, 目前地热能用于 20 万套住宅的采暖及热水供应。地热供暖规模宏大, 管理自动化, 现场井然有序, 环境清洁优美。

(三) 技术研究开发国际化

随着地热能开发利用在世界范围的发展, 形成了地热能这门能源学科, 地热产业作为新兴的能源产业崛起, 国际地热协会(IGA)于 1989 年正式成立。协会组织有关的学术界、产业界和教育界的组织和专家以及政府部门与国际机构开展国际交流与合

作, 传授地热知识与技术。每 5 年举行一次的世界地热大会提供了研讨地热能本质认识和地热能开发的公共论坛。国际能源机构(IEA, 联合国经济合作与发展组织机构, 设在法国巴黎)结合 1995 年在意大利举行的世界地热大会组织了地热专家组的第一次会议, 把地热能纳入 IEA 启动的一项新的可再生能源合作计划。随后的两次会议确定了地热能部分的 8 项合作课题。

美国近几年的统计表明, 地热发电成本由于应用新的勘察技术降低了 3%, 进一步提高竞争力的关键技术包括如下几方面: 采用小口径勘探井及与之相应的测试工具以及降低钻探成本, 开发井下裂隙测绘、圈定隐伏热储的技术, 提高地热井的生产能力, 缩短工程周期, 提高热储工程模型、管理模型技术。这反映了美国地热工业通过开发研究和改进现有技术以降低勘探开发利用成本, 从而提高地热能的开发竞争力。

(四)我国地热能开发利用状况

我国有利用温泉的久远历史记载。20 世纪 70 年代初, 地质学家倡导把地热作为可再生能源利用, 到现在已发现地热异常 3 200 处, 已打地热井 2 000 多眼, 评价的地热田有 50 多处, 主要用于取暖、水产、养殖、浴疗、农业和医疗等。我国的非电利用地热能消耗量已跃居世界第一位。30 多年来, 我国在地热能开发利用方面建立了西藏羊八井地热发电示范基地、天津地热区域采暖示范基地, 以及静海(天津市)、雄县(河北省)、新郑(河南省)和福建省农科院等 4 个农业利用示范基地和雄县与汝城(湖南省)热田科学管理技术示范县, 开展了地热资源评价, 高温地热开发研究, 地热温室利用技术, 地热种植及水产养殖(见图 1-2)、越冬、繁殖及高产技术, 地热采暖、干燥及孵化技术, 地热利用工程关键技术(见图 1-3), 地热水对环境影响及防治, 地热综合利用与管理等的研究与推广, 形成了一定的开发利用规模和地热产业。

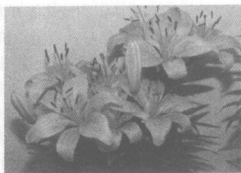


图 1-2 地热种植及水产养殖



图 1-3 地热医疗保健

我国地热发电从 20 世纪 70 年代初开始,经历了 1970~1985 年期间以中低温试验电站为主和 1985 年以后发展商业应用的高温地热电站两个阶段。目前,我国中、高温地热电站主要集中在西藏。西藏总装机容量达 28 MW,并且带动了地热采暖和温室(种植蔬菜)面积达 10 万 m^2 ,羊八井电站发电量占拉萨电网的 40% 以上,对缓解能源紧张状况举足轻重。随着市场经济的发展,预计 2020 年的地热电站装机容量将达到 400~585 MW,主要集中在西藏和云南,其他地区次之。

全国地热供暖面积突破 1 000 万 m^2 ,有地热疗养院及度假村上千座。天津市地热区域采暖由于近年来的房地产业兴旺而呈现快速发展态势。在 20 世纪 70~80 年代,开发利用的热储层较浅,地热水温较低,用途单一。90 年代之后,开采层位由第三系转向基岩热储,采出的地热水温度高达 97 $^{\circ}\text{C}$,多用于供暖及综合利用,如开发了地热矿泉水、水产养殖、地热游泳馆、温泉疗养宫等产业(见图 1-4)。1994 年,塘沽地热开发利用作为我国政府与冰岛政府的合作项目得到北欧投资银行和北欧发展基金提供的 27.8 万美元的优惠贷款,合作项目主要内容为开凿 3 眼深 2 000 m 左右的地热井、建立计算机控制的供暖供水系统、建立塘沽地区热储模型、建立塘沽地热试验研究中心及人员培训等,1996 年年底已完成。开凿的 3 眼优质高产地热井中,两眼地热井与其地面配套设施采用引进的技术和设备,自动调节供水温度和流量、控制管网压力的平衡及运行中采取系列措施减轻系统腐蚀。

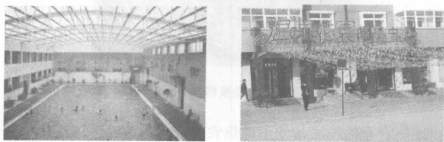


图 1-4 温泉洗浴

另外,近年来,北京地热开发呈现强势反弹,尤其是在申奥成功以后,北京市政府决定开凿 160 眼地热温泉,优化体育场馆的配置。再者,北京房地产业的发展带动了地热井的开发。目前,最大钻井深度达 4 000 m,最高温度达 90 ℃。如北京最大的国际标准室内温泉游泳池以及温泉中药桑拿浴、蒸汽浴等 60 多种,并且配有温泉垂钓中心、高尔夫球场、网球场、跑马场、射箭场等。如小汤山地区开发地热种植、养殖业(见图 1-5),建有 20 多 hm^2 地热温室,一年四季提供多种蔬菜;园林温室可向市场提供各类鲜花等。

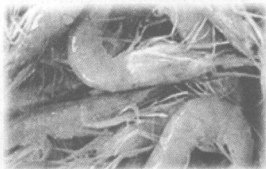


图 1-5 温泉种植、养殖

地热农业的发展带动了地热农业经济的快速发展。地热经济带动了种植业、养殖业、种子、种苗等产业的发展,对于改善人

们的生活及生存环境起到了不可忽视的作用。

随着社会的发展以及人们对健康环保要求的提高,地热能这一综合能源将广为人们所利用。只有把地热能开发利用纳入环境经济规划,才能充分、有效地发挥地热能的替代作用。21世纪必将是我国地热能资源开发利用的春天,“温泉经济”将是新的经济增长点。

三、国内外地热勘察技术

在当今世界面临能源危机的时代,开发人类脚下巨大而诱人的深部能源——地热,具有很大的现实意义。

(一)国外地热钻井情况

20世纪初,在世界范围内最早具有一定规模的地热开发是地热发电、供暖以及工农业利用。然而全球真正加快地热开发的步伐应是从20世纪70年代初开始。根据目前的技术水平,钻井深度3000m被认为是开发利用地热资源的经济界限。据统计,1995~1999年,美国施工地热井48眼;在美国,低于100℃的地热井40眼。美国的地热资源勘探主要由石油公司负责,采用石油钻井技术施工地热井。爱尔兰施工地热井249眼,意大利35眼,墨西哥167眼,井深大部分在1600~4000m之间。冰岛钻井公司自1930年起就从事地热钻井,在冰岛已钻低温地热井的总深度达6000多km。最近,德国的第一家地热发电厂在新城格勒沃启动,该发电厂从2200m深处汲取98℃的热水发电,同时第二口4500m的地热井已开钻。世界地热资源的直接利用各具特色,日本主要用于洗澡,冰岛主要是区域供热,匈牙利主要是农业温室。

美国近几年在勘探方面,开发了下列仪器、设备和技术:泥浆环流漏失诊治技术、硬岩破岩钻头、高温测量、数据无线遥测、小口径钻井成井技术,地热钻井组织研究、钻井系统的

研究等。

在水文水井钻探方面,发达国家几乎所有型号的水井钻机均采用先进的全液压传动机构,顶部有驱动装置,并配置机械手和存管架,实现钻杆操作半自动化,多数型号的水井钻机具有多用途、多功能和多工艺的优点,发达国家各制造公司均能提供由浅至深的系列化水井钻机,自动化钻杆操作系统已开始应用,进一步提高了劳动生产率。

从美国百年(1859~1995年)钻井业的实绩可见,在保证钻井质量的前提下,逐年完成钻井口数和钻井进尺不断增加,关键是提高了钻井效率,而快速钻井技术仍是美国钻井业关注的中心环节。美国也是世界上水井和地热井钻探技术最先进的国家,也是拥有水井钻机制造商和承包商最多的国家。

世界水井从最先的钻采第四系孔隙水为主发展到大量钻采深层岩层孔隙水和岩溶水。水井和地热井深度也从几十米到三四千米,甚至更深。

(二)国内地热钻井情况

我国的地热勘察开始于20世纪50年代中期,大致经历了4个主要发展阶段。

1956~1970年是地热资源勘察开发的起步探索阶段。因受设备能力及相关技术的制约,地热钻井技术手段单一,基本采用岩心钻探方法,施工深度小(500~600m),加之受市场环境制约,未形成市场需求。

1970~1985年是地热资源勘察开发的突破与发展阶段。这个阶段的资金由国家与社会两方面投入,基本上能够做到以探为主或以采为主,探采结合。既能满足用户需要,同时又能获取丰富的地质资料。在很多地方发现地热井钻井,如在河南省体育馆,由河南省地质工程公司以探采结合孔,成井900余m深的地热井,水温达40℃。

1986~1995年是地热资源勘察开发的缓慢发展阶段。此阶段国家及企业处于经济转型时期,国家对地热资源勘察投入减少,市场投入资金不足,地热资源勘察开发速度缓慢。虽然如此,但施工技术处在革新之中,国产设备逐渐配套,施工技术逐渐多样化,施工井深由于设备能力的增强不断延深,有的达到千米以上。

1996年到现在是地热资源勘察开发的快速发展时期。这是由于社会经济的快速发展,人民生活水平的不断提高,社会环保意识不断增强,旅游业、房地产业、现代农业发展对地热资源的需求日益增大。尤其是最近几年,全国各地开辟地热新区,除北京、天津、西安之外,我国其他省(市)、区(县)开发地热资源势头强劲,而且设备配套能力不断增强,许多新工艺、新方法、新技术不断涌现。在管理手段上,一些地区开始采用先进的信息化管理方法,使得地热资源的勘探开发利用更趋合理和规范。目前,我国的地热工程技术得到了长足的发展,资源利用量逐年增加。如天津市到2002年已有地热井219眼,其中回灌井13眼,投入运行的8眼,回灌状况良好。到2000年,我国地热直接利用量已达10 531 GW·h,居世界首位,地热井达2 500余眼。

从国内情况分析,已建立了一套比较完整的地热勘探技术方法、评价方法;地热开发利用工程勘探、设计、施工已有资质实体;设备逐渐配套、国产化,有专业制造厂商,监测仪器基本完备并国产化。作为地热钻井产业,目前已具备施工5 000 m深度内的地热钻探工程条件和水平,从事地热钻探的队伍基本形成规模,具备了大规模开发地热的能力,并向专业化、规范化方向发展。因此,进入21世纪,我国地热资源开发利用面临极好的发展机遇。

(1) 地热资源是一种无污染或极少污染的清洁能源。我国一

些大城市为净化环境出现开发地热能以部分替代常规能源的形势,例如北京、天津、西安等城市为治理大气污染发展地热采暖,北京市已将地热采暖列入能源调整计划。我国一些地区利用地热能发展现代化高效生态农业的积极性很高。

(2) 地热资源具有医疗保健作用。随着国民经济的发展以及人民生活水平的提高,一些投资商注意开发地热资源,建设以温泉为依托的度假村、康乐中心、住宅小区等,使地热旅游、康乐业和地热地产业如雨后春笋般地进入市场经济。

(3) 近 30 年的我国地热开发利用实践,已取得了一定的经验与成就,形成了一批示范基地和地热资源的钻井、设备制造、工程设计施工等服务业,有些地区建立了管理机构,制定了制度,为 21 世纪我国地热资源可持续开发利用奠定了基础。

(4) 我国地热资源的平均温度约 54.8°C 。 40°C 以下的地热资源或采暖后排放的 40°C 左右的水往往不能被很好利用,而应用热泵技术则可明显扩大地热利用的温度界限。目前推广应用高效节能热泵技术的条件日趋成熟,北京市已初见成效。

另一方面,地热开发利用也存在一些不容忽视的问题,主要是:①对地热资源是可持续开发利用的、清洁的、有竞争力的新能源认识不足,国家对地热资源勘察开发缺乏相应的政策和资金支持,社会各界对地热资源了解不多;②地热资源勘察工作薄弱,资源储备不足,地热市场供需矛盾日益尖锐;③地热资源开发利用规模化、产业化、商品化水平不高,热能利用率低,资源浪费比较严重;④地热资源管理体制不统一,开发利用情况不明,地热管理法规与系统的技术规程、规范尚待完善。

基于上述情况,提出下列建议:

(1) 提高对地热资源在国民经济生活中所处地位和作用的认知。我国地热资源丰富,每年可采地下热水资源量为 67.17 亿 m^3 。

目前的开采量仅为可采量的 5.82%。我国地热资源不是占有战略地位的能源,但在某些地区和方面可以起到多能互补、缓解能源供应紧张状况和改善生态环境的作用,而且地热是集热、矿、水于一体的具有多种用途的资源,有其他新能源不可替代的作用,应加强对地热资源的宣传,争取政府与社会的关注和支持,以加快我国地热资源开发速度,为我国社会经济可持续发展作出贡献。

(2) 调整地热资源开发利用的发展方向。我国中低温地热资源十分丰富且分布广泛,应加强对它的开发利用,并调整其发展方向:①为保护大气环境质量,加强发展地热采暖;②大力发展地热农业,带动高科技生态农业的快速发展;③积极促进地热医疗保健事业的发展;④地热资源要为西部大开发作贡献;⑤地热资源要为我国城镇化建设服务;⑥要高度重视油田地区的地热资源开发。

(3) 搞好地热资源的可持续开发利用与资源环境保护。

(三) 存在问题

虽然我国地热开发取得了较大业绩,但也存在着不容忽视的八大问题。

1. 新区与深部地热资源开发的风险问题

开发地热资源风险高、难度大,尤其是在新区或开发深部的地热资源都会有很高的风险,不应期望一举获取很大的成功。近几年,在新区和开发深部地热资源时有成功的,也有不少未能达到预期目的甚至失败的。因此,对新区地热资源的开发,必须对其主要储层分布、埋藏条件、渗透性能、地热水的初始来源、运移途径等有一定的认识。深 3 000 m 以上的深部地热资源开发则更应慎重。

2. 深部地质勘察技术问题

在盆地型地热田中,开采深部较高温度的地热资源是人们所

期望的,但开采的深度愈深,风险愈大。为了降低钻井风险,要求用投入少、精度高的地球物理勘察方法对深部的地质条件进行勘察,搞清深部地层结构、分布,为正确选定钻井位置和编制地质设计方案提供依据。目前,物探在深部地热地质勘察中的应用较为普遍,对其期望值也较高,但较为可靠的方法还不多,需要加强深部地球物理勘察技术方法的探索和新设备的研制,以适应深部和新区地热勘察开发的需要。

3. 成井工艺问题

这里包含有钻机设备选型、钻井结构设计、循环液的选用、防孔斜技术、防渗漏问题的处理技术、洗井技术等环节,任何一个环节处理不当,都可能导致钻井的失败。钻井深度越深,涉及相关的技术问题就越突出。如目前对深部弱渗透层的钻井泥浆使用、洗井技术,就是成井中很关键的问题,一些深井的成井难度大,在一定程序上均与此有关,这是在深部地热勘察钻井中必须认真思考的技术性问题。

4. 地热资源利用中所需用品的标准化问题

除钻机及其相关配套设备外,地热利用中的一些特殊产品,如耐高温的水泵水表、换热器、热泵、耐腐蚀的输水设备、水处理设备、各处计量仪表等均应标准化,建立适合我国地热开发利用所需的系列产品。

5. 资源优化配置问题

我国目前所开发利用的地热资源主要是中低温的水热型地热资源,是通过开采地热的载体——地热水来实现的。地热水是集热、矿、水于一体的宝贵资源,开发利用时必须充分考虑这一点,只有将这三方面的资源都充分利用,才能取得最佳的经济效益和资源环境效益,应避免对地热资源开发的单一化。

6. 地热资源评价问题

从我国目前对地热资源开发利用的实际情况看,有必要进行

地热单井允许开采量评价和全热田或集中开采地区地热资源评价。前者为地热井所有者提供开发利用规模的依据, 主要依据单井试验资料所确定的水流方程, 并考虑一定的干扰水位下降、动态趋势下降, 确定在一定的时间、降深条件下可持续开采利用的量; 后者为地热田规划、资源优化配置与开发管理提供充分的依据, 要依据全热田的总体开采量、开采动态变化等相应资料进行评价, 确定全热田可持续开发利用的量, 以防止单井或热田的过度开采所引起的问题。

7. 高矿化地热水污染防治问题

开发利用的部分地热水中溶解性总固体含量高, 有的高达 10 g/L 以上, 有的地热水中某些组分含量超过排放标准。这些地热水利用后随意排放会对环境造成一定的污染, 值得高度重视。

8. 热田管理与可持续利用问题

随着地热资源开发利用的普及, 一些地热田(或集中开发地区)的开采井不断增加, 少则几眼, 多则上百眼, 分属不同的单位和部门管理, 开采的相互干扰问题普遍存在。为了资源的可持续利用, 在这些地区建立统一的管理制度已势在必行。

地热开发中所用的钻井技术基本上是由石油工业派生出来的。为了适应高温环境下的工作要求, 对某些石油钻井的关键技术, 例如泥浆钻井, 进行了改进, 因为那些技术还不完全适用。所使用的材料和设备, 不仅需要满足高温作业要求, 还必须能适应在坚硬、断裂的岩层构造中和多盐的、有化学作用的液体环境中工作。因此, 现在在钻探行业中已形成了专门从事地热开发的分支行业。勘测岩浆矿床除了地震方法外, 还需要更好的传感测量技术。随着地热环境变得更热、更深及钻井磨削力的加大, 对钻井技术的要求越来越高, 所需经费也越来越多。开采地热过压能需要高压技术和使用稠重型钻井泥浆, 勘探开采干热岩体资源需要在非常坚硬的岩体上钻深井和制造一个可使液体在里面循环

的人造的热交换断裂层构造,还需要有一个或多个便于流体进出的深井井口装置。现在还没有研究出成功的岩浆钻井技术。岩浆开发将需要专门的钻井技术,以解决钻头和岩浆的相互作用问题、溶解气体的影响问题和岩浆中的热传输机理等各方面的问題。现在研究人员正努力研究能适应高温、高盐度和有化学作用的地热环境的先进方法和材料,以及能预报地热储藏层情况的更好方法。

第二节 中原地区地热概况

一、千米范围内的地热情况

河南地处中原,地质构造复杂,既有隆起山地,也有凹陷盆地,断裂褶皱发育,新构造运动比较活跃,地层发育比较齐全,岩浆活动比较强烈,为地热的储存、运移和开发提供了有利的地质条件。据 20 世纪 80 年代初全省地热资源调查资料,在基岩浅埋地区沿主要活动断裂分布有 30 多个温泉。近年来在南阳盆地、洛阳盆地、济源盆地和豫东平原广泛分布的第三系地层中,相继钻凿出了地热矿泉水。中原地区广布有大量的地热资源。

千米范围内的地热资源系指广泛分布于凹陷盆地范围内,主要为第三系地层组成的深度在千米左右的地热资源。

中原地区千米左右的地热资源大部分属于沉降盆地构造断裂型地热田。厚大的热储层、良好的盖层和地下岩体的加温导热,形成了特有的第三系赋水层。该层地下热水具有多层,承压、水量稳定,分布广泛之特征。该层地下热水的地温梯度在 $2.5 \sim 3.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,埋深 $800 \sim 1200\text{m}$,水量一般 $20 \sim 50\text{m}^3/\text{h}$,水温 $38 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 。据大量的钻井资料分析,千米范围内的含水砂层(砂砾岩层)虽系第三系地层,但大多数含水层松散,随着井深的增加,部分含水层虽胶结或半胶结,但总体上处于松散状态,易

于坍塌等。

二、中原地区千米井施工状况

中原地区地热资源开发走的是探、采结合的道路，自 20 世纪 80 年代在郑州、新乡、开封、许昌陆续开展地热勘探以来，先后在郑州、新乡、开封取得了良好成果。20 世纪后期到 21 世纪初，随着经济技术的发展和市场需求的增加，地热勘探开发步伐加快，表现出以下几个特点：

(1) 中心城市地热井数量和开采量剧增。城市是经济技术最活跃的地区，也是人口集中分布区。由于地热水温适宜，且含对人体有益的微量元素，用于洗浴和冬季家庭洗涮十分舒适，尤其是郑州、开封等地的地热水不仅水质优良，而且锶和偏硅酸两项指标达到了国家《饮用天然矿泉水标准》，口感很好，因而有许多单位要求打井。

(2) 地热开发范围逐渐向地、市、县等扩展。目前除郑州、开封、新乡之外，安阳、漯河、濮阳、南阳、商丘、中牟、原阳、兰考、民权、尉氏、通许、临颍、孟州、沁阳、温县、洛阳、周口等市(县)，均开凿了千米地热资源。

(3) 钻井深度有不断增加之势。随着技术设备的配套、生活质量的提高和环保需要，地热井钻凿深度呈现出向千米之外发展，对于中原地区来讲，大有突破第三系地层的迹象。地热水向双高发展，即“高水量、高水温”，如鹤壁市已开凿了两眼 3 000 m 左右的构造地热井。而且，地热水的使用向综合方向发展。

(4) 地热井钻井技术有了较大进步。20 世纪 80 年代，地热开发困难重重，不仅缺乏地质资料，对地层特性不了解，对单井水量和水温不能很好地预测掌握，而且施工技术不成熟，一眼千米地热井施工期长达 8~10 个月，孔内事故时有发生。即便有良好的热储层，单井出水量也难保证，成功率不足 70%，优质井率不

足 50%，不但打井单位效益不好，而且用户也颇为遗憾。20 世纪 90 年代以来，尤其是近几年来，钻井技术和成井工艺有了较大的发展，科学打钻逐渐被人们所接受，思想上的高度重视、设备配套能力的增强，加之技术的引进推广，使成井质量和效率不断提高，成本相对下降，一口千米井施工周期缩短到 2~3 个月，成功率达到 95% 以上。

地热井工程投资大，风险大，其中水量、水温、水质及含砂量等指标是投资者能否取得经济效益的关键。要降低投资及施工风险，必须加强对地热资源生成条件的研究（包括地层特性、水温、水量、水质、分布、补给等），而且需要研究推广新的施工技术工艺等，采用合理有效的钻井、成井工艺及物探等手段。目前，中原地区千米地热井施工存在的问题有以下几个方面：设备配置能力不足或不配套；钻具选择与井径的配置不合理；钻井工艺、成井工艺、口径大小与人工滤层设置有待提高；钻井液的质量及上返流速存在一定问题；新技术推广应用滞后等。

综上所述，中原地区地热井施工技术处于国内中等水平。由于战略性结构调整，使更多的队伍跻身于地热开发市场，市场的竞争造成了价格的下降，施工队伍在低价位上施工，使新技术的研究、开发和应用更加步履维艰，从而造成施工中技术保守，为片面追求质量，施工中增加不必要的投入，且施工周期长，影响整体地热井的开发。面对这样的局面，只有通过合理有效的途径，提高地热井开发中的技术含量，合理配置设备及机具，达到优质、高效、低耗施工，才能使企业创造最大利润。

第二章 设备配置及施工布置

第一节 设备选择

一、设备选择的原则

“工欲善其事，必先利其器。”千米地热井开发属高风险工程。地下工作遇到的情况十分复杂，因而地热开发设备选择的总体原则是“大马拉小车”。根据施工地区地层特性，地热井施工深度、钻井结构、钻柱结构及质量等，综合考虑设备的配置能力，同时要充分考虑到特殊情况下设备的储备能力。

二、钻机的选择

中原地区千米地热井施工，经过十几年的钻井实践，对于钻机的选择逐渐趋于合理化，钻机由最初的岩心钻机过渡到水源钻机及石油钻机。现在的发展趋势是：扭矩及提升力加大，即钻井配置(储备)能力增强。现在常用的钻机主要有表 2-1 所示的几种。

该系列钻机(见图 2-1)，机械传动、转盘回转，重心低，传动平稳；坚固耐用，操作安全，密封性能好；钻机布局合理，便于维修保养。同时，可采用石油钻探拧卸钻具工艺，用锚头轮装置拧卸钻具。

TSJ-2000、CZ-2000、CZ-2600 钻机储备能力较大，分别配有双联水刹车装置，以降低劳动强度，减少制动闸带和卷筒的磨损，延长设备的使用寿命，增加深井工作的安全可靠。

表 2-1 几种常用钻机的主要技术参数

技术参数		钻机型号				
		TSJ-660	TSJ-2000	CZ-2000	CZ-2600	RPS-3000
钻进深度 (m)	89 钻杆	1 000	1 350	2 000	2 600	2 500
	114 钻杆	500	1 100	1 800	2 300	1 700
	127 钻杆	300	800	1 500	2 000	1 300
转盘通径 (mm)		660	660	660	445	445
转盘转速 (r/min)		37,52, 84,145	45,50, 80,180	45,64, 103,178	43,63, 93,163	33, 58 75,132
转盘扭矩 (kN·m)		21	19	25	25	40
卷扬机单绳慢速提升能力 (kN)		60	80	90	100	100
可配备动力	电动机 (kW)	110	110	160	180	220
主机重量 (不含动力) (t)		7.6	6.9	8.2	10	18
备 注		不带水刹车	带水刹车	带水刹车	带水刹车	带水刹车

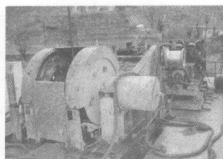
三、泥浆泵的选择

随着现代水井钻探技术的不断发展,泥浆泵作为钻井过程中的配套设备,越来越受到技术人员的高度重视。这一点在石油钻井中特别突出。作为设备配套的主要设备——泥浆泵,作者认为在某种情况下,泥浆泵比钻机显得更为重要。泥浆泵的选择主要考虑钻孔结构、钻具结构、孔深及泥浆流速等。泥浆泵虽不能直接破碎(冲刷)岩屑,但它为实现泥浆水力破岩提供了动力来源。因此,选择合理的泥浆泵,对于提高钻井效率、保证孔内安全等特别重要。其中,钻压、泵量及泵压构成井底破岩的关键技术参

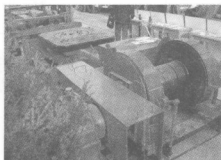
数。目前常用的泥浆泵(见图 2-2)的主要技术参数见表 2-2。



TSJ-2000



RPS-3000



CZ-2000



ZJ-23

图 2-1 钻机

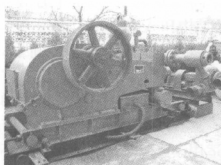


图 2-2 泥浆泵

表 2-2 几种常用泥浆泵的主要技术参数

型号	参数			
	公称流量 (L/min)	公称压力 (MPa)	活塞直径 (mm)	配备动力 (kW)
TBW-850 / 5	850	5	140	90
BW1200	1 200	4	150	90
	900	5.5	130	90
TBW-1000 / 8B	1 000	8	150	185
	1 200	7	160	185
TBW-1450 / 6	1 450	6	170	110 × 2
	900	10	140	110 × 2
NB-470	1 700	11	150	346
	1 250	15	130	(470 马力)
NB ₈ -600	1 600	15	150	441
	2 100	11	170	(600 马力)

从目前实际钻井情况看,不论是石油、天然气还是地热开发等钻井工程,对于水泵的要求,均向“大压力、大流量”方向发展,实现喷射钻井有利于钻速提高及井内安全。

四、钻塔及动力选择

(一) 钻塔选择

钻塔主要用于钻井工程的辅助工作,选择时重点考虑钻机性质、负载能力、钻柱的长度,根据空间大小等选择。常用的钻塔结构主要有两种(见表 2-3),即四角结构和 A 型结构。

表 2-3 中,AS 型塔为整体起升井架,游动系统运行空间大,司钻视野开阔,钻塔主体由左右两条大腿构成 A 型(见图 2-3),适用于场地面积大、施工区域风大、温度在 0℃ 以上的情况;HS 系列钻塔为角钢连接式四脚形结构,具有承载力大、重量轻、节距短、大门高、便于拆装之特点,适用于施工场地相对狭小、环境温度在 0℃ 以下的情况。TJ 系列为石油标志的 A 型塔。总之,钻塔的选择应根据自身配置情况综合而定。

表 2-3 几种钻塔的主要技术参数

钻塔型号	AS24-50	AS27-50	AS27-70	HS22-36	HS24-50	TJ125 / 31-A
材料	角钢	钢管	钢管	角钢	角钢	钢管
额定承载能力 (t)	50	50	70	36	50	125
塔架高度(m)	24	27	27	22	24	31
跨度(m)	5 × 3.1	5.5 × 3.5	5.5 × 3.5	—	—	6.3 × 3.5
二层平台高度	17.4	17.5	17.4	—	—	17.5
前大门高度 (m)	—	—	—	8.5	8.7	—
后门及侧高 (m)	—	—	—	4	8.7	—
钻台面积 (m ²)	—	—	—	6 × 6	6.5 × 6.5	—
天车台面积 (m ²)	—	—	—	1.4 × 1.4	1.4 × 1.4	—
配套天车	四轮 定滑车	五轮 定滑车	六轮 定滑车	三轮 座式	四轮座 式	六轮座式
塔架重量(kg)	8 600	10 900	15 590	8 160	13 000	23 000
限制风荷 (kg / m ²)	—			≤35		—

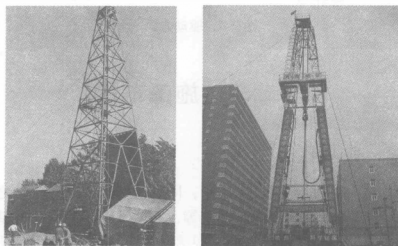
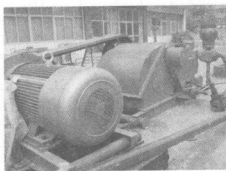


图 2-3 钻塔

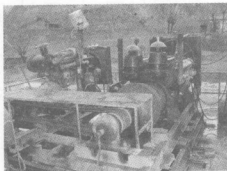
(二)动力选择

地热井施工要求速度快,所需动力较大,施工中必须有充足的动力来源作保证,才能使施工正常进行。动力的选择首先要考虑所处施工环境的电力配备情况以及区域内环境对噪音的要求。

千米地热井施工,当所施工区域在市内时,最好采用电力驱动钻机、泥浆泵等设备;当处于市外而电力无法满足时,考虑采用柴油机直接驱动,或电力与柴油机联合驱动(见图 2-4)。采用电力驱动时现场最好备用一台柴油机作停电时临时提升钻具。具体的动力选择,应根据环境情况及所用设备型号来确定功率大小及动力来源。



电力驱动



柴油机驱动

图 2-4 驱动方式

第二节 施工布置

一、地基承载力计算

地热井施工,孔斜要求严格,同时由于设备庞大,加之施工中钻具的重量以及下管时的重量等,一般情况下,天然地基很难承载上部机械等所产生的压力(见表 2-4),为了保证施工质量,要对天然地基进行处理。

表 2-4 岩石安全抗压强度

岩石类别	抗压强度 $A_{\text{抗}}$ (kg f / cm ²)
须爆破才能挖出的页岩及中等岩石	9.75 ~ 14.6
用镐头不易挖动的胶结砂岩及砾岩	7.8 ~ 9.75
用镐头不易挖动的软岩及崩散岩石	4.87 ~ 9.75
用镐头不易挖动的致密砂岩及砾岩	4.87 ~ 5.85
用镐头能挖动的硬黏土	3.9 ~ 4.87
粗砂岩及砾岩	3.9 ~ 4.87
松的中、粗砂岩及细的致密砂岩	2.92 ~ 3.9
用铁锹可以挖动的中等黏土	1.95 ~ 3.9
细松砂岩	0.98 ~ 1.95
软黏土	1.46

注: 1kgf=9.806 65N, 1kgf / cm²=0.098 066 5MPa, 下同。

(一)天然地基承载力计算

1. 地基承受的实际压力

$$P_{\text{实}} = Q_{\text{塔}} + Q_{\text{荷}} \cdot n \quad (2-1)$$

式中 $P_{\text{实}}$ ——地基承受的实际压力, kgf;

$Q_{\text{塔}}$ ——钻塔重量, kgf;

$Q_{\text{荷}}$ ——钻塔最大负荷, kgf;

n ——动负荷系数, $n=1.5 \sim 2.0$ 。

2. 天然地基能承载的安全压力 $P_{\text{安}}$

$$P_{\text{安}} = A_{\text{抗}} \cdot S \cdot r \quad (2-2)$$

式中 $A_{\text{抗}}$ ——天然地基安全抗压强度, kgf / cm²;

S ——基台木承压面与地基接触的总面积, cm²;

r ——基台木与地基接触不平衡系数, $r=0.5$ 。

要想采用天然地基必须使 $P_{\text{安}} \geq P_{\text{实}}$, 否则, 应采取地基加固措施。

(二)水泥地基基座尺寸

1. 混凝土基础面上的实际压力 $P_{\text{实}}$

$$P_{\text{实}} = \frac{nQ_{\text{荷}} + Q_{\text{塔}}}{4} \quad (2-3)$$

因是四角塔，故式(2-3)中分母为 4；若为 A 型塔，式(2-3)中分母为 2。

2. 混凝土基座对地面的压力 $P_{\text{基}}$

$$P_{\text{基}} = P_{\text{实}} + W \quad (2-4)$$

式中 W ——混凝土座自重，常忽略不计。

3. 混凝土基座尺寸

(1) 顶面积：

$$f = P_{\text{实}} / B_{\text{压}} \quad (2-5)$$

(2) 底面积：

$$F = P_{\text{基}} / A_{\text{抗}} \quad (2-6)$$

(3) 高度：

$$H = (F - f)P_{\text{实}} / (4F\sqrt{f \cdot B_{\text{剪}}}) \quad (2-7)$$

式中 $B_{\text{压}}$ ——混凝土抗压强度，通常 $B_{\text{压}} = 28.1 \text{ kgf/cm}^2$ ；

$B_{\text{剪}}$ ——混凝土抗剪强度，通常 $B_{\text{剪}} = 3.51 \text{ kgf/cm}^2$ 。

由于混凝土基础的纵断面内存在剪应力，故而必要时尚需进一步计算基座的高度，以保证足够的纵断面面积。

(三)实例计算

根据中原地区千米地热井常用的地基参数，代入以上公式计算如下。

(1) 地基承受的压力 $P_{\text{实}}$ ：

$$P_{\text{实}} = 15\,000 + 50\,000 \times 1.5 = 90\,000 \text{ (kgf)}$$

(2) 天然地基能承受的安全压力 $P_{\text{安}}$ ：

$$P_{\text{安}} = 1.46 \times 8 \times 25 \times 600 \times 0.5 = 87\,600 \text{ (kgf)}$$

(3) 混凝土基座对地面压力 $P_{\text{基}}$ ：

$$P_{基}=P_{实}+W=1/4 \times 90\,000=22\,500(\text{kgf})$$

(4) 混凝土基座尺寸:

顶面积 $f=801\text{ cm}^2$;

底面积 $F=15\,411\text{ cm}^2$;

混凝土高 $H=100\text{ cm}$ 。

(5) 实际采用的基础尺寸:

四个塔脚 $150\text{ cm} \times 150\text{ cm} \times 120\text{ cm} \times 4$ (长 \times 宽 \times 深 $\times 4$)

井口周围 $4\,300\text{ cm} \times 2\,500\text{ cm} \times 1\,500\text{ cm}$

整个基础面混凝土处理 30 cm 厚 ($800\text{ cm} \times 800\text{ cm}$)

以上共需混凝土 46 m^3 ; 所需材料计算混凝土配比 C20 (水泥 200 kg/m^3 , 石子 0.8 kg/m^3 , 砂 0.6 kg/m^3)。经计算: 水泥 9.2 t , 石子 37 m^3 , 砂 28 m^3 。

二、施工布局

根据施工场地大小和各种器械的使用要求以及在施工中的作用、活动影响空间等来合理、安全地布置施工机械及器具。按照“安全、实用、方便、有序”的原则进行摆布。

三、设备的拆、迁、安和运输

一般地基处理如图 2-5 所示:

地热井施工电器、机械设备多, 重量大, 钻塔高, 因此要求工作人员在拆、迁、安和运输各类设备、器械时, 要倍加小心, 首先做到安全第一, 其次要按操作程序、规程办事。

拆卸各类器械时, 要了解它的性能及如何拆卸; 拆卸钻塔时, 塔上塔下人员要密切配合, 由专人统一指挥, 塔上人员要系好安全带, 塔下人员要戴好安全帽, 塔上人员严禁向塔下抛东西; 大件设备拆卸要协调一致, 防止伤人。A 型塔的安装应按有关要求进行。

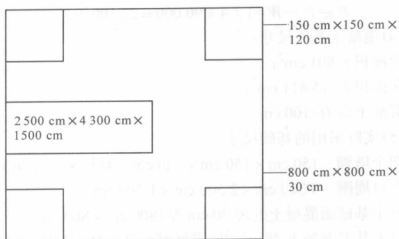


图 2-5 四角塔地基示意图

各类机械拆卸后，要迁移到安全地带，东西堆放要有序，该归类的归类，该捆绑的捆绑，该安装的要随时安装好，不能乱扔乱抛。对各类器械的进出油口、电器路进出口要保护好。

器械的安装要准确、稳固、周正，要由专人负责检查。钻机安装要周正、稳固、水平；钻塔安装要前后、左右正确到位，螺丝要上紧；钻机转盘中心、立轴中心，天车前边缘要达到三点一线；绷绳要互相对称地按要求数量安装，确保使用要求；避雷针安装要符合要求，随时做到安全可靠；各类器械的轴套及防护装置一定要安装到位，确保安全。

夜间不得进行安、拆钻塔作业。

地热井之间进行搬迁运输时，运前要查看所经过的路段情况（包括道路两侧、上空等）是否满足运输要求，否则应另选道路或进行个别处理后方能使用。搬迁时，要根据不同的器械选用相应的运输工具，一般情况下，不准超高、超长、超宽，并注意负载情况。雨、雪、雾天不得搬迁。路上注意行车速度、拐弯半径等。不能进行客货混装。总之，要做到装卸安全，运输安全。

第三章 钻井工艺

地热勘察施工的目的在于快速、优质、低耗、安全，实现地热成孔，为下一步的地热成井打下坚实的基础。地热钻进工艺的先进性、合理性是实现正常生产的基础。它所包括的内容有：钻孔结构的合理确定，钻进参数的合理选择，钻柱的合理级配方式，钻头类型的选择，钻井液的配制与维护，以及孔内事故的预防、处理和复杂地层的综合治理等方面，贯穿于施工过程的每一环节。因此，每个环节都对钻孔(井)质量、钻进效率和经济效益产生重大影响，所以施工中必须正确而合理地选择钻井工艺(见图 3-1)。

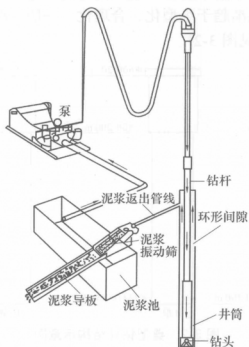


图 3-1 钻井示意图

第一节 钻孔结构

一、钻孔结构选择原则

钻孔结构的选择应根据钻孔深度和直径、地层特性、填砾厚度、钻进方法、成井结构及地热井勘察施工中的新技术应用，并考虑到施工设备的装备情况，按照“安全、合理、经济、实用”的原则设计钻孔结构^[1]。

二、常用的钻孔结构

随着技术工艺的研究、推广及对地层特性的逐渐了解，中原地区千米地热井施工中，钻孔结构的选择大体经过了3个阶段，目前钻孔结构逐渐趋于小型化、合理化。一般情况下，钻孔结构不要超过三级（见图3-2）。

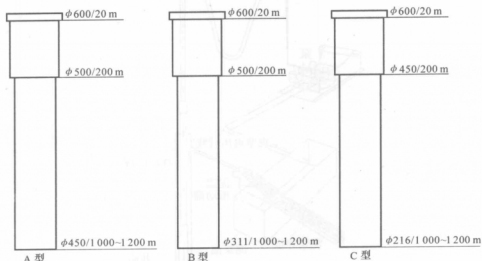


图 3-2 典型钻孔结构示意图

图 3-2 中，A 型钻孔结构基本被淘汰，B 型钻孔结构常用，C

型钻孔结构应逐渐推广。

三、钻孔直径的选择与水量的关系

大量的实践证明,钻孔直径的大小与水量大小之间具有一定的联系,也就是说,钻孔直径的选择在一定程度上影响水量。经过国内外理论及实践研究表明,钻孔直径大小对水量的直接影响应从两方面考虑。当在松散层中成井深度小于 200 m 时,由于地层相对松散,渗透系数较大,地下水补给来源水平及垂向快速等,在一定程度上(但不是无限值,一般最大直径不超过 2.0 m)与出水量基本成比例关系;当井深超过 200 m 时,水量与钻孔直径不成比例关系。因此,对于深层地热井而言,井径(取水段)的大小对出水量影响可以不计。

表 3-1 为引自美国英格索兰公司《水井钻探手册》的资料。

表 3-1 钻孔直径与水量的关系

孔径(in)	相对流量	孔径(in)	相对流量
4	1.00	12	1.15
6	1.04	24	1.27
8	1.08	48	1.42

注: 1 in=25.4 mm, 下同。

从表 3-1 可以看出,井径的增大与流量增加不成比例,如一个 8 in 直径的井的流量仅比同一位置、同一压力条件下 4 in 井径的流量增加 8%。

第二节 钻进方法

一般钻探施工中,钻进方法大体上(根据研磨材料)分 3 种,

但在石油钻井中一般采用牙轮钻头，并向复合刀片与牙轮钻头联合钻进方向发展。而千米地热井钻进中，从最初的合金回转钻进以及全孔取心等方法，被采用牙轮钻头全面钻进所取代，并逐渐向 PDC 与牙轮钻头联合钻进方向发展。随着新技术及工艺的推广，应用联合钻进技术越来越重要(回转、气举、冲击、井下动力等组合)。

一、钻头的选择与使用

(一) 钻头的选择

钻头的选择要根据钻孔结构、钻遇地层的特性以及施工技术工艺等作相应的调整，按照“安全、快速、低耗、长寿”的原则考虑。现代钻井中已基本淘汰了钢粒、硬质合金等筒状钻头，已普遍采用石油钻井中的牙轮钻头，随着设备配置能力、钻进工艺的合理配套，牙轮钻头的使用由原来的使用石油钻井的旧钻头，逐步变为采用全新的石油钻井钻头或 PDC 钻头。

采用牙轮钻头钻进，由于牙轮具有公转、自转、冲击、自洁等性能，其回转阻力要比同等压力下合金钻头小得多，加之钻铤加压、钻压仪控制，大泵量钻进，不但增加了钻头上的水功率(同石油钻进相比还有较大差距)，而且钻孔垂直度高，为顺利成井打下了坚实基础。

中原地区千米井施工，钻进中钻遇地层主要为第四纪、第三纪沉积及少量三叠、二叠系基岩地层。因此，钻进中选择“中硬”和“硬”三牙轮钻头以钢齿为主，并视地层情况辅以少量镶齿钻头。

为了更好地使用并掌握牙轮钻头的使用情况，钻进中应参考表 3-2、表 3-3、图 3-3。

表 3-2 国产三牙轮钻头系列代号

类别	系列名称		代号
	全称	简称	
铣齿 钻头	普通三牙轮钻头	普通钻头	Y
	喷射式三牙轮钻头	喷射式钻头	P
	液动密封轴承喷射式三牙轮钻头	密封钻头	MP
	液动密封轴承保径喷射式三牙轮钻头	密封保径钻头	MPB
	滑动密封轴承喷射式三牙轮钻头	滑动轴承钻头	HP
	滑动密封轴承保径喷射式三牙轮钻头	滑动保径钻头	HPB

表 3-3 国产三牙轮钻头的型号

地质性质		极软	软	中软	中	中硬	硬	极硬
型号	型式代号	1	2	3	4	5	6	7
	原型代号	JR	R	ZR	Z	ZY	Y	JY
适用岩层举例		泥岩 石膏 盐岩 软页岩 白垩 软石灰岩		中软页岩 硬石膏 中软石灰岩 中软砂岩	硬页岩 石灰岩 中软石灰岩 中软砂岩	石英砂岩 硬白云岩 硬石灰岩 大理岩	燧石岩 石英岩 玄武岩 黄铁矿 花岗岩	
钻头体颜色		乳白	黄	淡蓝	灰	墨绿	红	褐

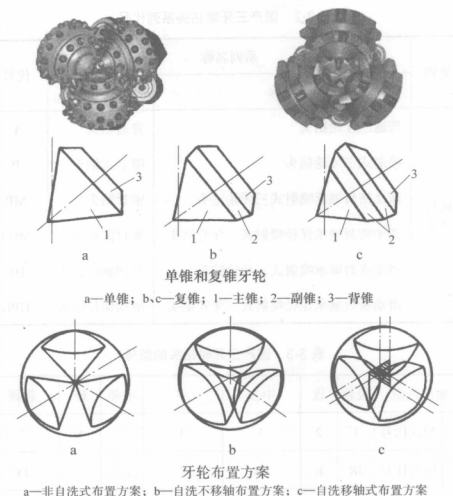
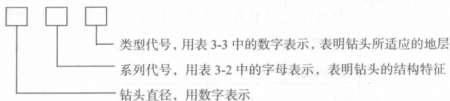


图 3-3 三牙轮钻头

国产牙轮钻头型号表示方法如下：



例：用于中软地层直径为 $12\frac{1}{4}$ in (311 mm) 的铣齿滑动密封轴

承喷射式三牙轮钻头的型号为 $12\frac{1}{4} \times \text{HP}_3$ 或 $311 \times \text{HP}_3$ 。

钻头的尺寸以其钻出的孔(井)眼内径为公称尺寸,国际上已形成基本统一的系列,常见钻头尺寸为 26、20、 $17\frac{1}{2}$ 、 $14\frac{3}{4}$ 、 $12\frac{1}{4}$ 、 $10\frac{5}{8}$ 、 $9\frac{1}{2}$ 、 $7\frac{7}{8}$ 、 $6\frac{1}{2}$ 、 $5\frac{7}{8}$ 、 $4\frac{3}{4}$ in (1 in=25.4 mm)。

钻头的技术、经济指标包括以下几方面:

(1)钻头进尺:指一个钻头钻进的井眼总长度;

(2)钻头工作寿命:指一个钻头的累计总使用时间;

(3)钻头平均机械钻速:指一个钻头的进尺与工作寿命之比。

钻头单位进尺成本,按下式计算

$$C_{\text{pm}} = \frac{C_b + C_r(t + t_t)}{H} \quad (3-1)$$

式中 C_{pm} ——单位进尺成本,元/m;

C_b ——钻头成本,元;

C_r ——钻机作业费,元/h;

t ——钻头钻进时间, h;

t_t ——起下钻及接单根时间, h;

H ——钻头进尺, m。

(二)钻头的使用

牙轮钻头工作原理包括钻头在井底的运动方式及破岩方式,这些内容是设计、改进钻头的基础和依据,也是选择和使用钻头的基础和依据。需要指出的是,提高钻头钻进效率的措施固然是一个基本方面,但是及时地将岩屑从井底清除也是一个同样重要的方面,两者缺一不可。

牙轮钻头是使用范围最广的钻头,主要原因在于选择不同的钻头设计参数(包括齿高、齿距、齿宽、移轴距、牙轮布置等),可以适应于不同的地层需要。牙轮钻头的使用重点考虑以下情况:

(1)地层的软硬程度和研磨性。软地层应选择兼有移轴、超顶、复锥三种结构,牙轮齿形较大、较尖,齿数较少的钢齿或镶

齿钻头，以充分发挥钻头的剪切破岩作用。随着岩石硬度增大，选择钻头的上述三种结构值应相应减少，牙齿也要减短、加密。钻研磨性地层，应该选用有保径齿的镶齿钻头。

(2) 钻进井段的深浅。浅井段岩石一般较软，同时起下钻所需时间较短，应使用能获得较高机械钻速的钻头；深井段地层一般较硬，起下钻时间较长，应使用有较高总进尺的钻头。

(3) 易斜地层及软硬交错地层。在易斜地层钻进，应使用不移轴或移轴量小的钻头，同时在保证移轴量小的前提下，所选的钻头适应的地层应比所钻地层稍软一层，这样可以在较低的钻压下提高机械钻速；在软硬交错地层钻进时，一般应按其中较硬的岩石选择钻头类型，这样既可在软地层中有较高的机械钻速，又能顺利地钻穿硬地层。在钻进过程中参数要及时调整，在软地层钻进时，可适当降低钻压并提高转速；在硬地层钻进时可适当提高钻压并降低转速。

选用的钻头对所要钻的地层是否适合，要通过实践的检验才能下结论。对于同一地层使用过的几种类型的钻头，在保证井内质量的前提下，一般以“每米成本”作为评价钻头选型使用是否合理的标准。

钻头使用应注意以下事项：

(1) 钻头入孔前检查内容。钻头出厂时间，钻头丝扣是否完好，钻头实际外径大小，牙轮转动是否灵活，轴承间隙是否过大，轴承润滑情况是否缺油；传压孔是否畅通，牙轮是否互咬，轮掌磨损情况，是否有裂纹、变形等。建议孔深后最好使用新钻头。

(2) 钻头入井使用。清洗丝扣、涂丝扣油、拧卸钻头时，注意不得伤害牙齿及轴承；下钻操作要平稳，不得猛墩，发现遇阻时不得硬压、硬墩，应开泵划眼（扫孔）；划眼时钻压、转速要适当，并记录井深。钻头下至距井底 2~3 m 时，先开泵循环钻井液，然后再转动钻具，缓慢下放钻柱到井底；钻头到底后轻压慢

转 20 min, 再逐渐放至规定钻压及转速, 严禁加压启动转盘。一般情况下, 不使用牙轮钻头扩孔。

二、受力分析与设计^[3]

钻柱是钻头以上、水龙头以下部分的钢管柱的总称, 它包括方钻杆、钻杆、钻铤、各种接头及稳定器等井下工具。钻柱是钻井的重要工具, 它是连通地下与地面的枢纽。在转盘钻井时, 靠它来传递破碎岩石所需要的能量, 给井底施加钻压, 以及循环钻井液等。在井下动力钻进时, 井下动力钻具是用钻柱送到井底并靠它来承受反扭矩, 同时钻头和动力钻具所需的液体能量也是通过钻柱输送到井底的。随着钻井深度的增加, 对钻柱性能的要求越来越高。钻柱在井下的工作条件十分恶劣, 它往往是钻井设备与工具中的薄弱环节。因此, 根据钻柱在井下的工作条件及工艺要求, 合理地设计钻柱和使用钻柱, 对于预防井内钻具事故、实现快速优质钻井及顺利成井等具有十分重要的意义。

(一) 钻柱的组成

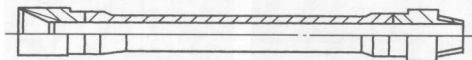
钻柱由方钻杆、钻杆段和下部钻具组合三大部分组成。钻杆段包括钻杆和接头, 有时也装有扩眼器。下部钻具组合主要是钻铤, 有时也安装稳定器、减震器、扩眼器等工具。钻柱的具体组成随目的、要求的不同而不同。常见的典型钻具组合见图 3-4。

1. 钻杆

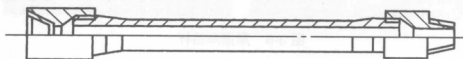
1) 钻杆结构与规范

钻杆结构见图 3-5, 钻杆尺寸及代码见表 3-4。钻杆由钻杆管体与钻杆接头两部分组成。钻杆管体与接头的连接有两种方式: 一种是用细丝扣连接, 即管体两端都有细公扣, 与接头一端的细母扣相连接, 称这种钻杆为有细扣钻杆; 另一种是管体与接头用摩擦焊对焊在一起, 称这种钻杆为对焊钻杆(见图 3-6)。除石油部门外, 其他部门大部分使用有细扣钻杆, 但随着地热井施工深

千米地热井常用钻杆外径为 88.9 mm，随着钻井技术的配套，钻杆外径逐渐向 114.3 mm、127.0 mm 发展。



(a) 对焊钻杆



(b) 有细扣钻杆

图 3-5 钻杆结构示意图

表 3-4 钻杆尺寸及代码

钻杆外径		外径 代码	壁厚 (mm)	内径 (mm)	重力 (N / m)	重力 代号
mm	in					
60.30	2 ³ / ₈	1	4.826	4.826	50.70	1
			7.112	7.112	46.10	2
73.00	2 ⁷ / ₈	2	5.512	62.00	100.00	1
			9.195	54.60	151.83	2
88.90	3 ¹ / ₂	3	6.452	76.00	138.69	1
			9.374	70.20	194.16	2
			11.405	66.10	226.18	3
101.66	4	4	6.655	88.30	173.00	1
			8.382	84.80	204.38	2
			9.652	82.30	229.20	3
114.30	4 ¹ / ₂	5	6.883	100.50	200.73	1
			8.560	97.20	242.34	2
			10.922	92.50	291.98	3
			12.700	88.90	333.15	4
			13.975	86.40	360.03	5
127.00	5	6	7.518	112.00	237.73	1
			9.195	108.60	284.68	2
			12.700	101.60	373.73	3
139.70	5 ¹ / ₂	7	7.722	124.30	280.30	1
			9.169	121.40	319.71	2
			10.541	118.60	360.59	3

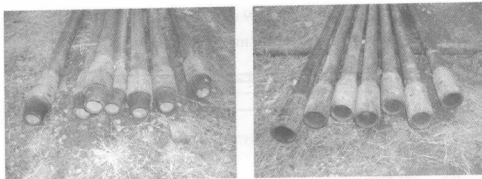


图 3-6 摩擦焊钻杆

2) 钻杆的钢级与强度

钻杆的钢级是指钻杆钢材的等级，它由钻杆钢材的最小屈服强度决定。API 规定钻杆的钢级有 D、E、95 (X)、105 (G)、135 (S) 级共 5 种，见表 3-5。其中，X、G、S 级为高强度钻杆。钻杆的钢级越高，管材的屈服强度越大，钻杆的各种强度（抗拉、抗扭、抗外挤等）也就越大。表 3-6 列出了新钻杆的强度数据。在钻杆的强度设计中，推荐采用提高钢级的方法来提高钻柱的强度，而不鼓励采用增加壁厚的方法。

表 3-5 钻杆钢级

物理性能		钻杆钢级				
		D	E	95 (X)	105 (G)	135 (S)
最小屈服强度	MPa	379.21	517.11	655.00	723.95	930.70
	lb / in ²	55 000	75 000	95 000	105 000	135 000
最大屈服强度	MPa	586.05	723.95	861.85	930.79	1 137.64
	lb / in ²	85 000	105 000	125 000	135 000	165 000
最小抗拉强度	MPa	655.00	689.48	723.95	792.90	999.74
	lb / in ²	95 000	100 000	105 000	115 000	145 000

3) 钻杆接头及丝扣

国产钻杆接头一般都采用 35CrMo 合金钢。

表 3-6 钻杆强度数据

钻杆外径		名义重量		抗拉屈服强度 (kN · m)						按最小屈服强度计算的最小抗拉力 (kN)						最小抗挤压力 (MPa)						按最小屈服强度计算的抗内压力 (MPa)					
	in	N / m	D	E	95	105	135	D	E	95	105	135	D	E	95	105	135	D	E	95	105	135	D	E	95	105	135
mm																											
60.3	$2\frac{7}{8}$	97.12	6.21	8.46	0.71	11.85	15.25	451.02	615.04	779.06	861.02	107.00	78.89	107.58	136.27	150.62	193.65	78.27	106.69	135.17	149.38	192.07					
73.0	$2\frac{7}{8}$	151.86	11.47	15.64	19.82	21.90	28.16	699.45	953.75	1208.10	1335.27	1716.79	83.52	113.86	144.20	159.38	204.96	83.59	114.00	144.34	159.58	205.17					
		138.71		19.15					864.40					69.24					65.66								
88.9	$3\frac{1}{2}$	194.14	18.42	25.12	31.82	35.17	45.21	886.02	1208.41	1350.66	1691.73	2175.11	71.38	97.30	123.31	136.27	175.17	69.79	95.17	120.55	133.24	171.13					
		226.22	20.94	28.55	36.16	39.97	51.39	1053.38	1436.28	1819.27	2101.78	2585.29	84.83	115.65	146.55	161.93	208.20	85.17	116.14	147.10	162.55	200.03					
		172.95		26.36					1206.77					58.00					59.31								
101.6	4	204.31	23.13	31.53	39.49	44.15	56.75	931.24	1269.77	1605.45	1777.66	2285.60	57.45	78.27	99.17	109.65	139.10	54.76	74.69	94.62	104.55	134.41					
		200.71		15.07					1201.56					49.65					54.48								
114.3	$4\frac{1}{2}$	242.30	30.58	41.71	52.83	58.39	75.07	1078.52	1470.90	1863.09	2058.24	2647.58	52.55	71.65	87.93	95.32	115.86	49.72	67.78	85.86	94.90	122.00					
		291.95	36.63	49.97	63.28	69.94	89.92	1345.55	1843.89	2241.18	2568.83	3302.76	65.58	89.38	113.24	125.17	160.89	63.45	86.48	109.58	121.10	155.72					
		284.78	40.87	55.73	70.59	78.03	100.32	1290.86	1760.31	2229.71	2464.39	3168.51	50.96	68.96	82.83	89.58	108.27	48.07	65.52	83.03	91.72	118.00					
127.0	5	372.40	51.88	70.74	89.61	99.05	127.36	1729.92	2358.97	2988.08	3302.58	4246.19	68.27	93.10	117.93	130.34	167.58	66.34	90.48	114.62	126.76	162.89					
		319.71	50.35	68.66	86.97	96.12	123.58	1426.36	1945.06	2463.72	2723.05	3501.08	45.59	58.21	68.93	74.04	87.85	43.59	59.38	75.24	83.17	106.96					
139.7	$5\frac{1}{2}$	360.52	56.16	76.59	97.02	107.23	137.87	1622.50	2124.92	2802.48	3097.49	3982.30	52.90	72.14	89.10	96.55	116.70	50.07	68.27	86.48	95.58	122.96					

丝扣的连接必须满足三个条件,即尺寸相等、丝扣类型相同、公母扣相匹配。不同尺寸钻杆的接头尺寸不同。同一尺寸钻杆的丝扣类型也不尽相同。各钻杆生产厂家的钻杆采用的接头类型也很难完全一致。因此,为便于区分钻杆接头和工程应用,API 对钻杆接头的类型作了统一的规定,形成了石油工业普遍采用的 API 钻杆接头,具体可参考有关 API 标准,以便地热钻井配用。

在钻柱中,除了钻杆接头外,还有各种配合接头(用来连接不同尺寸或不同扣型的管柱)、保护接头(保护管柱上经常拆卸处的丝扣)等。此外,方钻杆、钻铤、钻头及其他井下工具也都靠丝扣连接。上述各种接头及工具的丝扣类型都与钻杆接头的标准相一致。

2. 钻铤

钻铤(见图 3-7)处在钻柱的最下部,是下部钻具组合的主要组成部分。其主要特点是壁厚大(一般为 38~53 mm,相当于钻杆壁厚的 4~6 倍),具有较大的重力和刚度。它在钻井过程中主要起到以下几方面的作用:

- (1) 给钻头施加钻压;
- (2) 保证压缩条件下的必要强度;
- (3) 减轻钻头的振动、摆动和跳动等,使钻头工作平衡;
- (4) 控制井斜。

钻铤有许多不同的形状,如圆形、方形、三角形和螺旋形等。最常用的是圆形(平滑的)钻铤和螺旋形钻铤两种。螺旋形钻铤上有浅而宽的螺旋槽,可减少其与井壁接触面积的 40%~50%,而其重力只减少 7%~10%。接触面积小,可减少发生压差造成的吸附卡钻的可能性。API 标准钻铤规范见表 3-7。表中的钻铤类型代号由两部分组成,第一部分为 NC 型(数字型接头)螺纹代号,第二部分的数字(取外径的前两位数字乘以 10)表示钻铤外径(英寸),中间用短线分开。



图 3-7 常见钻铤

表 3-7 API 钻铤规范 (API SPEC 7)

钻铤类型	外 径		内 径		长 度		重 力		上扣扭矩 (kN · m)	
	mm	in	mm	in	m	ft	lbf / ft	N / m	最小	最大
NC23-31	79.40	3 ¹ / ₈	31.80	2 ¹ / ₄	9.1	30	22	321	4.45	4.90
NC26-35 (2 ⁷ / ₈ IF)	88.90	3 ¹ / ₂	38.10	1 ¹ / ₃	9.1	30	27	394	6.25	6.90
NC31-41 (2 ⁷ / ₈ IF)	104.80	4 ¹ / ₈	50.80	2	9.1	30	35	511	9.00	9.90
NC35-47	120.70	4 ³ / ₄	50.80	2	9.1	30	50	730	12.50	13.50
NC38-50 (3 ¹ / ₂ IF)	127.00	5	57.20	2 ¹ / ₄	9.1 或 9.2	30	53	774	17.50	19.00
NC44-60	152.40	6	57.20	2 ¹ / ₄	9.1 或 9.2	30 或 31	83	1 212	31 650	35.00
NC44-62	158.80	6 ¹ / ₄	57.20	2 ¹ / ₄	9.1 或 9.2	30 或 31	91	1 328	31.50	35.00
NC44-62 (4IF)	158.80	6 ¹ / ₄	71.40	2 ¹³ / ₁₆	9.1 或 9.2	30 或 31	83	1 212	30.00	33.00
NC46-65 (4IF)	165.10	6 ¹ / ₂	57.20	2	9.1 或 9.2	30 或 31	99	1 445	38.00	42.00
NC46-65 (4IF)	165.10	6 ¹ / ₂	71.40	2 ¹³ / ₁₆	9.1 或 9.2	30 或 31	91	1 328	30.00	33.00
NC46-67 (4IF)	171.50	6 ³ / ₄	57.20	2 ¹ / ₄	9.1 或 9.2	30 或 31	108	1 577	38.00	42.00
NC50-70 (4 ¹ / ₂ IF)	177.80	7	57.20	2 ¹ / ₄	9.1 或 9.2	30 或 31	117	1 708	51.50	56.50
NC50-70 (4 ¹ / ₂ IF)	177.80	7	71.40	2 ¹³ / ₁₆	9.1 或 9.2	30 或 31	110	1 606	43.50	48.60
NC50-72 (4 ¹ / ₂ IF)	184.20	7 ¹ / ₄	71.40	2 ¹³ / ₁₆	9.1 或 9.2	30 或 31	119	1 737	43.50	48.00

续表 3-7

钻铤类型	外径		内径		长度		重力		上扣扭矩 (kN·m)	
	mm	in	mm	in	m	ft	lbf/ft	N/m	最小	最大
NC56-77	196.90	7 ³ / ₄	71.40	2 ¹³ / ₁₆	9.1 或 9.2	30 或 31	139	2 029	65.00	71.50
NC56-80	203.20	8	71.40	2 ¹³ / ₁₆	9.1 或 9.2	30 或 31	150	2 190	65.00	71.50
6 ⁵ / ₈ REG	209.60	8	71.40	2 ¹³ / ₁₆	9.1 或 9.2	30 或 31	160	2 336	72.00	79.00
NC61-90	228.60	9	71.40	2 ¹³ / ₁₆	9.1 或 9.2	30 或 31	195	2 847	92.00	101.00
7 ⁵ / ₈ REG	241.30	9 ¹ / ₂	76.20	3	9.1 或 9.2	30 或 31	216	3 153	119.50	
NC70-100	254.00	10	76.20	3	9.1 或 9.2	30 或 31	243	3 548	142.50	156.50
NC70-110	279.40	11	76.20	3	9.1 或 9.2	30 或 31	299	4 365	194.00	214.50

3. 方钻杆与稳定器(扶正器)

方钻杆位于钻柱的最上端,有四方形和六方形两种(见图 3-8)。钻进时,方钻杆与方补心、转盘补心配合,将地面转盘扭矩传递给钻杆,以带动钻头旋转。方钻杆上端至水龙头的连接部

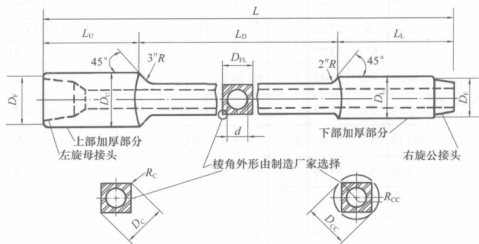


图 3-8 方钻杆结构

位的上扣均为左旋丝扣(反扣),以防止钻杆转动时卸扣。方钻杆下端至钻头的所有连接丝扣均为右旋转扣(正扣),在方钻杆带动钻柱旋转时,丝扣越上越紧。为减轻方钻杆下部接头丝扣(经常拧卸部位)的磨损,常在该部位装一保护接头。四方方钻杆的强度见表 3-8,常用方钻杆规范见表 3-9。

表 3-8 四方方钻杆的强度 (API RP 7G)

方钻杆尺寸		下部丝扣		套管最小外径		抗拉屈服强度 (kN)		抗扭屈服强度 (kN)		抗弯强度 (kN · m)	
mm	in	类型	外径 (mm)	mm	in	下部公扣端	驱动部分	下部公扣端	驱动部分	驱动部分 对角	驱动部分 对边
63.5	2 ¹ / ₂	NC26	85.70	114.30	4 ¹ / ₂	1 850	2 420	130.10	20.60	20.45	30.00
76.2	3	NC31	104.80	130.70	5 ¹ / ₂	2 380	3 170	19.60	32.60	30.10	49.35
88.9	3 ¹ / ₂	NC38	120.70	168.30	6 ⁵ / ₈	3 220	3 940	30.80	48.00	48.95	75.00
108.0	4 ¹ / ₂	NC46	158.80	219.10	8 ⁵ / ₈	4 680	5 820	53.30	83.50	85.40	131.90
108.0	4 ¹ / ₂	NC50	161.90	219.10	8 ⁵ / ₈	6 320	5 700	77.60	85.30	87.30	133.70
133.4	5 ¹ / ₂	5 ¹ / ₂ FH	177.80	224.50	9 ⁵ / ₈	7 150	9 250	99.00	167.50	170.40	257.80

在钻铤柱的适当位置安装一定数量的稳定器(见图 3-9),组成各种类型的下部钻具组合,可以满足钻直井时防止井斜的要求;稳定器的使用还可以提高钻头工作的稳定性,从而延长钻头使用寿命。稳定器有 3 种基本类型:刚性稳定器、不转动橡胶套稳定器和滚轮稳定器。具体使用可参考有关石油钻井资料(见图 3-10)。

表 3-9 常用方钻杆规范

方钻杆 规格	驱动 部分 长度 L_D			全长 L		上部内螺纹连接						下部外螺纹连接			驱动部分				质量 kg																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
						规格和 类型	长度	倒角 直径	规格 和 类型	外 径	长 度	倒 角直 径	内 径	对 角宽	对 边宽	棱角半 径	棱角半 径																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	LH	D_u	标准	选择	标准													选择		RH	D_L	L_L	D_{BL}	d	D_C	D_{CC}	D_{FL}	R_C	R_{CC}																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
																														标	选	标	选	标	选	标	选	标	选	标	选	标	选	标	选																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
	mm	in	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm

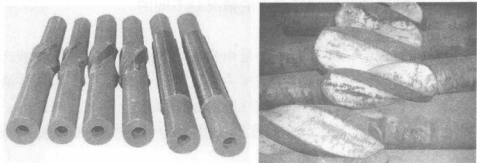


图 3-9 稳定器

旋转叶片型				不转动套	滚轮
螺旋叶片		直叶片			
短型	长型	短型	长型		

图 3-10 稳定器的基本类型

(二)钻柱的受力分析

在钻井过程中，钻柱在井下受到多种载荷(轴向拉力及压力、扭矩、弯曲力矩、离心力、外挤压力等)的作用。在不同的工作状

态下，不同部位的钻柱其受力的情况是不同的。

1. 轴向拉力和压力

钻柱受到的轴向载荷主要是由自重产生的拉力、由钻井液产生的浮力和因加钻压而产生的压力。此外，钻柱与井壁、钻井液间的摩擦，循环钻井液时在钻柱内及钻头水眼上所消耗的压力，起下钻时上提或下放钻柱速度的变化等均会产生附加的轴向载荷。

(1) 钻柱在垂直井眼中悬挂时，在井眼内没有钻井液的情况下，处于悬挂状态的钻柱仅受到自重力的作用，由上而下处于受拉伸状态。最下端拉力为零，井口处拉力最大。此时，钻柱截面处(假定在钻杆上)的拉力可按下式计算

$$F_0 = q_p L_p + q_c L_c \quad (3-2)$$

式中 F_0 ——空井中的钻杆任一截面处的拉力，它等于该截面以下钻柱在空气中的重力，kN；

q_p 、 q_c ——钻杆、钻铤单位长度的重力，kN/m，称为“线重”；

L_c ——钻铤长度，m；

L_p ——截面以下钻杆长度，m，若计算截面落在钻铤上，则 $L_p=0$ 。

当井眼内充满钻井液时，钻柱除了受自重力的作用外，还受到钻井液静液压力的作用。钻柱所有与钻井液相接触的表面上的静液压力与面积乘积的合力，称为浮力，方向向上。浮力的作用减轻了钻柱的重力作用，使钻柱的轴向拉力减小。此外，作用于钻柱内外表面上的侧向静液压力虽然合力为零，但对钻柱管体却形成侧向挤压作用。研究指出：钻井液浮力和静液压力侧向挤压作用对钻柱轴向力的综合影响结果，相当于使钻柱的线重减轻了，其减轻程度可用系数 K_B 表示

$$K_B = 1 - q_d / q_s \quad (3-3)$$

式中 K_B ——浮力系数；

q_d ——钻井液密度， g / cm^3 ；

q_s ——钻柱钢材密度， g / cm^3 。

考虑钻井液浮力和静液压力的横向挤压作用后，钻柱任一截面处的轴向拉力可按下式计算

$$F_m = K_B(q_p L_p + q_c L_c) = K_B F_0 \quad (3-4)$$

式中 F_m ——悬挂在钻井液中的钻柱任一截面上的轴向拉力， kN ，它等于该截面以下钻柱在钻井液中的浮力。

(2) 正常钻进时，下放钻柱，把部分钻柱的重力加到钻头上作为钻压。钻压使钻柱的轴向拉力都减小一个相应数值，而且下部钻柱受压缩应力的作用。钻柱任一截面上的轴向拉力为

$$F_W = K_B(q_p L_p + q_c L_c) - W \quad (3-5)$$

式中 F_W ——钻进时(有钻压)钻柱任一截面上的轴向拉力， kN ；
 W ——钻压， kN 。

由上可知，作用在钻柱某一截面上的轴向拉力等于该截面以下的钻柱浮重减去钻压，其分布如图 3-11 所示。由图可以看出：上部钻柱受拉力作用，井口处最大，向下逐渐减小；下部钻柱受压力作用，井底处最大；在某一深度处，轴向力等于零。此时，把钻柱上的轴向力等于零的点(N点)定义为中性点，亦称中和点。

中性点的概念最早是由鲁宾斯基提出来的。他认为，中性点将钻柱分为两段，上面一段钻柱在钻井液中的重力大约等于悬重，下面一段钻柱在钻井液中的重力等于钻压(这种提法只适用于垂直井的钻柱)。

根据中性点的定义，垂直井眼中钻柱的中性点高度可按下式确定

$$L_N = W / q_c K_B \quad (3-6)$$

式中 L_N ——中性点距井底的高度，m。

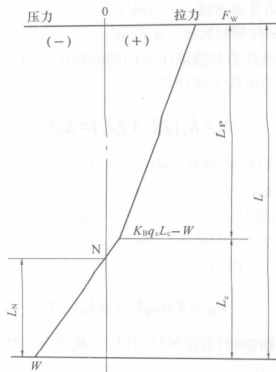


图 3-11 钻柱轴向受力分布

钻柱的中性点在实际钻井中有着重要意义。中性点是钻柱受拉与受压的分界点。在实际钻井中，我们希望中性点始终落在刚度大、抗弯能力强的钻铤上，而不是落在强度较弱的钻杆上，使钻杆一直处于受拉伸的直线稳定状态，以免钻杆受压弯曲和受交变应力作用。因此，地热井施工中使用的钻铤长度不能小于中性点高度，也就是说，钻铤的浮重不能小于钻压，这就是所谓的“重原则”。目前，许多钻井实践都遵循这一原则来确定钻铤的长度。

另外，在钻进过程中，钻柱除了受到重力（浮重）和钻压的作用外，循环钻井液时在钻柱内及钻头水眼上的压力降还会在钻柱

内产生附加的轴向拉伸应力，相当于钻柱受到一个拉伸载荷。具体可按下式计算

$$F_n = (\Delta P_i + \Delta P_b) A_i \times 10^{-4} \quad (3-7)$$

式中 F_n ——循环压耗引起的附加轴向拉力，kN；

ΔP_i ——截面以下钻柱内压耗；kPa；

ΔP_b ——钻头水眼处的压耗，kPa；

A_i ——钻柱流道截面面积， cm^2 。

(3) 起下钻时，作用在钻柱上部的轴向力，除了钻柱的重力（浮重）外，还有井壁及钻井液对钻柱的摩擦力 F_f 和提升或下放速度变化所产生的动载 F_d 。

F_f 的大小与钻井液性能、井壁岩石性质、钻柱结构、井眼深度及井身质量等因素有关，难以准确计算，应结合地热钻井现场的具体情况来确定。提供以下经验公式供计算时参考

$$F_f = (0.2 \sim 0.3) F_m \quad (3-8)$$

F_d 与起下钻操作状况及起升时加速、下钻时减速情况有关。提供以下公式供计算时应用

$$F_d = \frac{v}{gt} F_m \quad (3-9)$$

式中 F_d ——提升钻柱加速或下钻减速阶段产生的动载，N；

v ——大钩提升或下放速度， m/s ；

t ——加速或减速所延续的时间，s；

g ——重力加速度， m/s^2 。

综上所述，考虑摩擦力 F_f 和动载 F_d 的作用，钻柱任一截面处轴向力 F_t 为

$$F_t = K_B (q_p L_p + q_c L_c) \pm F_f + F_d \quad (3-10)$$

式中 F_f ——起钻时取正号，下钻时取负号。

以上钻柱轴向力计算都是指井眼垂直的情况。斜孔计算比较复杂，需要时可参考有关钻井文献。

2. 扭矩

在地热井施工过程中,采用转盘钻井时,必须通过转盘把一定的扭矩传递给钻柱,用于旋转钻柱和带动钻头破碎岩石。钻柱受到钻头扭矩的作用,在钻柱各个截面上都产生剪应力。钻柱所受剪应力的大小与钻柱尺寸、钻头类型及直径、岩石性质、钻压和转速、钻井液性质及井眼质量等因素有关,很难准确计算。钻柱承受的扭矩在井口处最大,向下随着能量的消耗逐渐减小,在井底处最小(在井下动力施工中,钻柱承受的扭矩为动力钻具的反扭矩,在井底处最大,向上逐渐减小)。

3. 弯曲力矩

正常钻进时,当施加的钻压超过钻柱的临界值时,下部钻柱就产生弯曲变形。一般情况下,地热井施工基本上采用转盘钻进,钻柱在离心力的作用下亦会产生弯曲。另外,钻柱在弯曲的井眼内工作时也将发生弯曲。产生弯曲变形的钻柱在轴向压力的作用下将受到弯曲力矩的作用,在钻柱内产生弯曲应力。在弯曲状态下,钻柱如绕自身轴线旋转,则会产生交变的弯曲应力。弯曲应力的大小与钻柱的刚度、弯曲变形部分的长度及最大挠度等因素有关。由于井下钻柱的弯曲变形是一个十分复杂的力学问题,故弯曲力矩及弯曲应力的计算也十分复杂,在此不作深入讨论。只要大家了解在地热钻井中多种应力的存在,施工时注意结合实际情况防止井内事故。

4. 离心力

当钻柱绕井眼轴线公转时,将产生离心力。离心力会引起钻柱弯曲或加剧钻柱的弯曲变形。地热井钻进中,由于所钻口径较大而钻柱相对较细,在转速作用下很容易产生大的离心力,这在实际地热井施工中要特别注意。

5. 外挤压力

挤压力主要来自于钻柱内外压差及使用卡瓦起下钻时钻柱受

到的卡瓦很大的箍紧力。卡瓦的挤压作用将使钻柱的抗拉强度降低，特别在地热深井钻井时要考虑。钻柱内外液体比重相差较大，钻柱底部被封堵时，钻柱下到井底时，钻柱底部受到最大挤压力。因此，地热井施工过程中，要加强对钻柱的检查，防止由于外挤压力造成井内事故。尤其在后期下管过程中，要特别注意下管速度、泥浆进入井管内的流速等。我们曾经碰到过由于井管内外压差而挤扁滤水管等的现象。

6. 纵向振动

地热井施工中，使用牙轮钻头钻井引起钻柱的纵向振动，在钻柱中性点附近产生交变的轴向应力。纵向振动和钻头结构、地层性质、泵量不均匀、钻压及转速等因素有关。当纵向振动的周期和钻柱本身固有的振动周期相同时(或成倍数)，就会产生共振现象，振幅急剧增大，称之为“跳钻”。严重的跳钻常常造成钻头损坏、钻杆磨损加剧以及迅速的疲劳破坏。实际钻进中防止出现长时间跳钻现象。

7. 扭转振动

当井底对钻头旋转的阻力不断变化时，会引起钻柱的扭转振动，因而产生交变剪应力，降低钻柱的寿命。扭转振动和钻头结构、岩石性质的均匀程度、钻压及转速等因素有关。特别是使用刮刀钻头钻软硬交错地层时，钻柱将产生剧烈的扭振，出现所谓“蹩跳”现象。

8. 横向摆振

在实际钻井中发现，在某一临界转速下，钻柱将出现摆振，其结果是使钻柱产生公转，引起钻柱严重偏磨。

综上所述，我们可以了解到，转盘钻井时钻柱的受力是比较复杂的。这些载荷就性质而言，可分为不变的和交变的两大类。由轴向载荷和扭矩产生的拉应力、压应力和剪应力属于不变力；属于交变应力的有弯曲应力、扭转振动引起的剪应力以及纵向振

动所产生的拉应力和压应力。在整个钻柱长度内,载荷作用的特点是在井口处主要受不变载荷(拉应力)的作用而靠近井底则主要是交变载荷(拉、压、弯曲应力)等。这种交变载荷的作用正是钻柱疲劳破坏的主要原因。

由以上分析不难看出,钻进时,钻柱下部受力最为严重,因为钻柱同时受到轴向压力、扭矩和弯曲力矩的作用,更为严重的是弯曲钻柱存在着剧烈的交变应力循环,常常导致钻柱的疲劳破坏。钻头突然遇阻、遇卡会使钻柱受到的扭矩大大增加。起下钻时,井口处钻柱受到最大拉力。如果猛提猛刹,会使井口处钻柱受到的轴向拉力大大增加。钻进时,井口处钻柱所受拉力、扭矩都最大,受力情况比较严重。由于地层岩性变化、钻头的冲击和纵向振动等因素的存在,使得钻压大小不均匀,因而使中性点附近的钻柱受拉压交变载荷的作用,容易产生疲劳破坏。

(三)钻柱组合

钻井施工中,合理的钻柱组合是确保优质、高效、安全钻井的重要条件;尤其是对千米深地热钻井,钻柱在井下的工作条件十分复杂与恶劣,因此钻柱的组合就显得更为重要。钻柱组合包括钻柱尺寸选择和强度设计两方面的内容。一般应遵循以下两个原则:第一,满足强度(抗拉强度、抗挤强度等)要求,保证钻柱安全工作;第二,尽量减轻整个钻柱的重力,以便在现有的抗负荷能力下钻更深的井。

1. 钻柱尺寸选择

具体对某一口井而言,钻柱尺寸的选择首先取决于钻头尺寸和钻机的提升能力,同时,还要考虑当地的特点,如地质条件、井身结构、钻具供应及防斜措施等。为了使地热钻进更趋于石油系列,实现钻柱的安全,这里借鉴了石油钻井的有关配合。石油钻井中常用的钻头和钻柱尺寸配合见表 3-10。

表 3-10 钻井尺寸与钻柱尺寸配合

钻头直径 (mm (in))	钻铤外径 (mm (in))	钻杆外径 (mm (in))	方钻杆方宽 (mm (in))
>299 (11 ³ / ₄)	203 (8)	168 (6 ⁵ / ₈)	152 (6)
248 ~ 299 (9 ³ / ₄ ~ 11 ³ / ₄)	178 ~ 203 (7 ~ 8)	140 (5 ¹ / ₂)	133, 152 (5 ¹ / ₄ , 6)
197 ~ 248 (7 ³ / ₄ ~ 9 ³ / ₄)	152 ~ 178 (6 ~ 7)	114, 127 (4 ¹ / ₂ , 5)	108, 133 (4 ¹ / ₄ , 5 ¹ / ₄)
146 ~ 216 (5 ³ / ₄ ~ 8 ¹ / ₂)	146 (5 ³ / ₄)	89 (3 ¹ / ₂)	89, 108 (3 ¹ / ₂ , 4 ¹ / ₄)

从表 3-10 可以看出, 一种尺寸的钻头可以使用两种尺寸的钻具, 具体选择就要依据实际条件。选择的基本原则是:

(1) 方钻杆由于受到扭矩和拉力最大, 在配置可能的情况下, 应尽量选用大尺寸方钻杆。

(2) 在钻机提升能力允许的情况下, 选择大尺寸钻杆是有利的。因为大尺寸钻杆强度大、水眼大、钻井液流动阻力小, 而且由于环空较小, 钻井液上返速度大, 有利于携带岩屑。入井的钻柱结构力求简单, 以便于起下钻操作。地热井施工中目前大都使用 $\phi 89$ mm (3¹/₂ in) 钻杆, 这是不合理的级配, 建议使用 $\phi 114$ mm 或 $\phi 127$ mm 钻杆及其组合等。

(3) 钻铤尺寸一般选用与钻杆接头外径相等或相近的尺寸。有时根据防斜措施来选择钻铤的直径。随着钻机配置能力的提高, 近年来, 在钻井中下部钻具组合更多地使用大直径钻铤。因为使用大直径钻铤具有以下优点: ①可用较少的钻铤满足所需钻压的要求, 减少钻铤可减少起下钻时拧卸钻铤的时间; ②钻铤和井壁的间隙较小, 可减少连接部分的疲劳破坏; ③提高了钻头附近钻柱的刚度, 有利于改善钻头工况; ④有利于防斜。

2. 钻铤长度的确定

钻铤长度取决于钻压与钻铤尺寸, 其确定原则是: 保证在最

大钻压时钻杆不承受压缩载荷，即保持中性点始终处在钻铤上。
由下式可计算钻铤配置长度

$$L_c = \frac{S_N \cdot W_{\max}}{q_c \cdot K_B \cdot \cos \alpha} \quad (3-11)$$

式中 L_c ——钻铤长度，m；

W_{\max} ——设计的最大钻压，kN；

S_N ——安全系数，防止遇到意外附加力（动载，井壁摩擦力等）时，中性点移到较弱的钻杆上，一般取 $S_N = 1.15 \sim 1.25$ ；

q_c ——单位长度钻铤在空气中的重力，kN/m；

α ——井斜角度数，直井时， $\alpha = 0$ 。

3. 钻杆柱强度设计

由钻杆的受力分析可知，不论是起下钻还是正常钻井，经常作用于钻杆且数值较大的力是拉力。而且井越深，钻杆柱越长，钻杆柱上部受到的拉力越大。但对某种尺寸和钢级的钻杆，其抗拉强度是一定的，因此都有一定的可下深度。所以，在一般情况下，钻杆柱的设计主要是抗拉强度，即按抗拉强度确定其可下入深度。在以抗拉伸计算为主的钻杆强度设计中，主要考虑由钻柱重力（浮重）引起的静拉载荷，其他一些载荷（如动载、摩擦力、卡瓦挤压力的影响及解卡上提力等）通过一定的设计系数来考虑。

1) 钻杆柱设计的强度条件

钻杆柱任一截面上静拉伸载荷应满足以下条件

$$F_t \leq F_a \quad (3-12)$$

式中 F_t ——钻杆柱任一截面上的静拉伸载荷，kN；

F_a ——钻杆柱的最大安全静拉力，kN。

钻杆柱所能承受的最大安全静拉力的大小取决于钻杆材料的

屈服强度、钻杆尺寸以及钻柱的实际工作条件。

(1) 钻杆在屈服强度下的抗拉力 F_y 。钻杆所承受的拉伸载荷必须小于钻杆材料的屈服强度下的抗拉力 F_y 。

$$F_y = 0.1 \cdot \sigma_y \cdot A_p \quad (3-13)$$

式中 F_y ——最小屈服强度下的抗拉力, kN, 可以计算, 也可以从表 3-6 中查出;

σ_y ——钻杆钢材的最小屈服强度, MPa;

A_p ——钻杆的横截面积, cm^2 。

(2) 钻杆的最大允许拉伸力 F_p 。当钻杆所受拉伸载荷达到 F_y 时, 材料将发生屈服而产生轻微的永久伸长。为了避免这种情况的发生, 一般取 F_y 的 90% 作为钻杆的最大允许拉伸力 F_p 。

$$F_p = 0.9 F_y \quad (3-14)$$

(3) 钻杆的最大安全静拉力 F_a 。最大安全静拉力是指允许钻杆所承受的由钻柱重力(浮重)引起的最大载荷。考虑到其他一些拉伸载荷, 如起下钻时的动载及摩擦力、解卡上提力及卡瓦挤压的作用等, 钻杆的最大安全静拉力必须小于其最大允许拉伸力, 以确保安全。根据石油钻井钻杆选择原则, 目前, 用于确定钻杆的最大安全静拉力的方法有三种:

一是安全系数法。考虑起下钻时的动载及摩擦力, 一般取一个安全系数 S_t , 以保证钻柱的工作安全, 即

$$F_a = F_p / S_t \quad (3-15)$$

式中 S_t ——安全系数, 一般取 1.30。

二是设计系数法(考虑卡瓦挤压)。对于深井钻柱来说, 由于钻柱重力大, 当它坐于卡瓦(见图 3-12)中时, 将受到很大的箍紧力。当合成应力(大于纯拉应力)接近或达到材料的最小屈服强度时, 就会导致卡瓦挤毁钻杆。为了防止钻杆被卡瓦挤毁, 要求钻杆的屈服强度与拉伸应力的比值不能小于一定数值。此值可根据钻杆抗挤条件得出, 由式 3-16 确定。

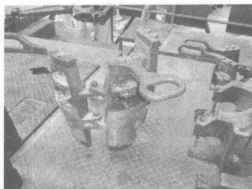


图 3-12 钻杆卡瓦

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_t} = \left[1 + \frac{d_p K_s}{2L_s} + \left(\frac{d_p K_s}{2L_s} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-16)$$

$$K_s = 1 / \tan(\alpha + \phi)$$

式中 σ_y ——材料的屈服强度, MPa;

σ_t ——由悬挂在吊卡下面钻柱重力引起的拉应力, MPa;

d_p ——钻杆外径, cm;

L_s ——卡瓦长度, cm;

K_s ——卡瓦的横向负载系数, 以平均值计算, $K_s=4$;

α ——卡瓦锥角, 一般为 $9^\circ 27' 45''$;

ϕ ——摩擦角, $\phi = \arctan \mu$, μ 为摩擦系数, 约为 0.08。

为便于应用, K_s 值和 σ_y / σ_t 比值计算结果见表 3-11。

考虑卡瓦挤压的影响, 要限制钻杆的拉伸载荷, 使屈服强度 σ_y 与拉伸应力 σ_t 的比值不能小于表 3-11 中的数值, 并以此值作为设计系数, 确定钻杆的最大安全静拉力, 即

$$F_a = F_p / \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_t} \right) \quad (3-17)$$

表 3-11 防止卡瓦挤毁钻杆的 σ_y / σ_t 比值

卡瓦长度 (mm)	摩擦系数 (μ)	横向负载系数 (K_s)	钻杆尺寸 (mm)						
			60.3	73.0	88.9	104.6	108.0	127.0	139.7
			最小比值 (σ_y / σ_t)						
304.8	0.06	4.35	1.27	1.34	1.43	1.50	1.58	1.66	1.73
	0.08	4.00	1.25	1.31	1.39	1.45	1.52	1.59	1.66
	0.10	3.68	1.22	1.28	1.35	1.41	1.47	1.54	1.60
	0.12	3.42	1.21	1.26	1.32	1.38	1.43	1.49	1.55
	0.14	3.18	1.19	1.24	1.30	1.34	1.40	1.45	1.50
406.4	0.06	4.36	1.20	1.24	1.30	1.36	1.41	1.47	1.52
	0.08	4.00	1.18	1.22	1.28	1.32	1.37	1.42	1.47
	0.10	3.68	1.16	1.20	1.25	1.29	1.34	1.38	1.43
	0.12	3.42	1.15	1.18	1.23	1.27	1.31	1.35	1.39
	0.14	3.18	1.14	1.17	1.21	1.25	1.28	1.32	1.365

注：摩擦系数 0.08 用于正常润滑情况。

三是拉力余量法。考虑钻柱被卡时的上提解卡力，钻杆柱的最大允许静拉力应小于其最大安全拉伸力一个合适的数值，并以它作为余量，称为“拉力余量”（记为 ΔF ），以确保钻柱不被拉断。

$$F_a = F_p - \Delta F \quad (3-18)$$

式中 ΔF ——拉力余量，一般取 200 ~ 500 kN。

在采用拉力余量法设计钻柱时，必须使钻柱每个断面上的拉力余量相同，这样在提拉钻柱时就不会因某个薄弱面而影响和限制总的提拉载荷的大小。

综上所述，对以上公式整理（将式 (3-14) 代入式 (3-15)、式 (3-17)、式 (3-18)）可得

$$F_a = 0.9 F_y / S_t \quad (3-19)$$

$$F_a = 0.9 F_y / (\sigma_y / \sigma_t) \quad (3-20)$$

$$F_a = 0.9 F_y - \Delta F \quad (3-21)$$

一般地,在钻杆设计中,钻杆的最大安全静拉力取决于安全系数 σ_y / σ_t 值、 S_t 和拉力余量三个因素。可分别用式(3-19)、式(3-20)及式(3-21)计算 F_a , 然后从三者中取最低者作为最大安全静拉力, 据此计算钻杆柱的最大允许配置长度。

2) 钻杆柱设计

(1) 单一钻杆柱长度设计。对同一尺寸、壁厚和钢级的钻杆柱, 可以计算出它的最大安全静拉力 F_a , 从而算出该钻杆柱的最大允许长度 L , 因为 $F_a = (L \times q_p + L_c \times q_c) K_B$, 所以, 最大允许长度为

$$L = (F_a / K_B - L_c \times q_c) / q_p \quad (3-22)$$

式中 L ——钻杆柱的最大允许长度, m;

F_a ——钻杆的最大安全拉力, kN;

q_p ——单位长度钻杆在空气中的重力, kN / m;

L_c ——钻铤柱长度, m;

q_c ——单位长度钻铤在空气中的重力, kN / m。

如果最大允许长度 L 满足不了设计井深的要求, 则重新选择更高一级的钻杆进行计算, 直到满足要求为止。

(2) 复合钻杆柱长度设计^[3]。在深井和超深井钻井中, 经常采用复合钻杆柱, 即采用不同尺寸(上大下小), 或不同壁厚(上厚下薄), 或不同钢级(上高下低)的钻杆组成的钻杆柱。复合钻杆柱与单一钻杆柱相比具有很多优点, 它既能满足强度要求, 又能减轻钻柱的重力, 允许在一定的钻机负荷能力下钻达更大的井深, 如果再采用高强度钻杆或铝合金钻杆, 还可以进一步提高钻柱的许下深度和钻机的钻井深度。设计复合钻杆柱时, 应自下而上逐段确定各段钻杆的最大长度。承载能力最低的钻杆应置于钻铤之上, 承载能力较强的钻杆置于较弱钻杆之上。自钻铤上面第一段钻杆起, 各段钻杆的最大长度按下列公式计算

$$L_i = \frac{F_{a1}}{q_{p1} K_B} - \frac{q_c L_c}{q_{p1}} \quad (3-23)$$

$$L_2 = \frac{F_{a2}}{q_{p2}K_B} - \frac{q_c L_c + q_{p1} L_1}{q_{p2}} \quad (3-24)$$

$$L_3 = \frac{F_{a3}}{q_{p3}K_B} - \frac{q_c L_c + q_{p1} L_1 + q_{p2} L_2}{q_{p3}} \quad (3-25)$$

$$L_4 = \frac{F_{a4}}{q_{p4}K_B} - \frac{q_c L_c + q_{p1} L_1 + q_{p2} L_2 + q_{p3} L_3}{q_{p4}} \quad (3-26)$$

式中 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 ——钻铤上面第 1、第 2、第 3、第 4 段钻杆的最大允许长度，m；

F_{a1} 、 F_{a2} 、 F_{a3} 、 F_{a4} ——相应各段钻杆的最大安全静拉力，kN；

q_{p1} 、 q_{p2} 、 q_{p3} 、 q_{p4} ——相应各段钻杆单位长度在空气中的重力，kN/m。

注意：如果各段钻杆的实际长度不等于理论计算长度，则应把实际的 L_1 代入式 (3-24) 来计算 L_2 ，把实际的 L_2 代入式 (3-25) 来计算 L_3 ，把实际的 L_3 代入式 (3-26) 来计算 L_4 。

(3) 抗外挤强度计算。一般以一个适当的安全系数去除钻杆的最小抗挤强度作为其允许外挤压力，即

$$p_{ca} = p / S_c \quad (3-27)$$

式中 p_{ca} ——钻杆许用外挤压力，MPa；

p ——钻杆的最小抗挤强度，MPa；

S_c ——安全系数，一般应不小于 1.125。

(4) 抗扭强度计算。在钻井过程中，钻杆承受的实际扭矩很难准确计算，可以用下式近似估算

$$M = 9.67 \times p / n \quad (3-28)$$

式中 M ——钻杆承受的扭矩，kN·m；

p ——使钻柱旋转所需的功率，kW；

n ——钻柱转速，r/min。

应特别注意的是,在一般情况下加于钻杆上的扭矩不允许超过钻杆接头的紧扣扭矩,推荐的钻杆接头紧扣扭矩在 API · RP7G 标准中已有规定,钻杆接头的紧扣扭矩是防止钻杆接头损坏的惟一最主要的因素。要求施加于钻杆上的扭矩不应超过规定值,若施加扭矩过大,则会在接头丝扣处产生很高的轴向载荷,会造成丝扣变形、折断,公接头伸长、剪断,母接头胀大、胀裂等钻具事故。

(5) 抗内压强度计算。钻杆柱偶尔也会受到较大的净内压力。不同尺寸、钢级和级别的钻杆的最小抗内压力可在 API · RP7G 标准中查得,用适当的安全系数去除它,即得其许用净内压力。

3) 典型钻柱的设计举例

典型钻柱的设计举例见表 3-12。

表 3-12 钻柱组合设计结果

规 范	长度 (m)	在空气 中重 (kN)	在钻井 液中重 (kN)
钻铤: 外径 158.75 mm、内径 57.15 mm 线重 1.35 kN / m	190	256.5	218
第一段钻杆: 外径 127 mm、内径 108.60 mm 线重 0.285kN / m E 级	3 708	1 057	898
第二段钻杆: 外径 127 mm、内径 108.6 mm 线重 0.285 kN / m X-95 级	902	257	219
合 计	4 800	1 570.5	1 335

(1) 设计参数: 井深 4 800 m; 井径 215.9 mm (8 $\frac{1}{2}$ in); 钻井液密度 1.2 g / cm³; 钻压 180 kN; 井斜角 3°; 拉力余量 200 kN (假设); 卡瓦长度 406.4 mm; 安全系数 1.30 (假定)。

(2) 钻铤选择: 选用外径 158.75 mm (6 $\frac{1}{4}$ in)、内径 57.15 mm (2 $\frac{1}{4}$ in) 钻铤, 每米重力 $q_c = 1.35$ kN / m。用公式 $L_c = W_{\max} S_N / (q_c K_B \cdot \cos \alpha)$

计算钻铤长度, 则有

$$L_c = 180 \times 1.18 / (1.35 \times 0.846 \times \cos 3^\circ) = 186 \text{ (m)}$$

按每根钻铤 10 m 计算, 需用 19 根钻铤, 总长为 190 m。

(3) 选择第一段钻杆(接钻铤): 选用外径 127 mm, 内径 108.6 mm, 最小抗拉载荷 $F_y = 1\,760 \text{ kN}$, 计算最大长度。

最大安全静拉载荷计算如下

$$F_{a1} = 0.9F_y / S_t = 0.9 \times 1\,760 / 1.30 = 1\,218.46 \text{ (kN)}$$

$$F_{a1} = 0.9F_y / (\sigma_y / \sigma_v) = 0.9 \times 1\,760 / 1.42 = 1\,115.49 \text{ (kN)}$$

$$F_{a1} = 0.9F_y - \Delta F = 0.9 \times 1\,760 - 200 = 1\,384 \text{ (kN)}$$

由上面计算结果可以看出, 按卡瓦挤毁比值计算的 F_{a1} 值最小, 则第一段钻杆的允许长度为

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{F_{a1}}{q_{p1}K_B} - \frac{q_c L_c}{q_{p1}} \\ &= 1\,115.49 / [(284.78 / 1\,000) \times 0.85] - 190 \\ &\quad \times 1.35 / (284.78 / 1\,000) = 3\,708 \text{ (m)} \end{aligned}$$

显而易见, 需要增加一较高强度的钻杆, 方能达到设计井深 (5 000 m)。

(4) 选择第二段钻杆: 选用外径 127 mm, 内径 108.6 mm, 每米重 284.78 N, X-95 级的新钻杆, 最小抗拉载荷为 $F_y = 2\,229.71 \text{ kN}$ 。

最大长度计算如下

$$F_{a2} = 0.9 \times 2\,229.71 / 1.30 = 1\,543.645 \text{ (kN)}$$

$$F_{a2} = 0.9 \times 2\,229.71 / 1.42 = 1\,413.196 \text{ (kN)}$$

$$F_{a2} = 0.9 \times 2\,229.71 - 200 = 1\,806.739 \text{ (kN)}$$

则第二段钻杆的最大允许长度为

$$L_2 = \frac{F_{a2}}{q_{p2}K_B} - \frac{q_c L_c + q_{p1} L_1}{q_{p2}}$$

$$\begin{aligned}
&= 1\,413.196 / [(284.78 / 1\,000) \times 0.85] \\
&\quad - (1.35 \times 190 + 284.78 / 1\,000 \times 3\,708) / 0.285 \\
&= 1\,233 \text{ (m)}
\end{aligned}$$

则 $L = L_1 + L_2 = 3\,708 + 1\,233 = 4\,941 \text{ (m)} > 4\,800 \text{ m}$

满足设计要求。

三、钻进参数选择

众所周知,在钻井过程中,钻进的速度、成本和质量将会受到多种因素的影响和制约,这些影响和制约因素可分为可控因素和不可控因素。不可控因素是指客观存在的因素,如所钻地层性质、目的层深度等;可控因素是指通过一定的设备和技术手段可进行人为调节的因素,如地表机泵设备、钻头类型、钻井液性能、钻压、转速、泵压与排量等。所谓钻进参数就是指表征钻进过程中的可控因素所包含的设备、工具、钻井液以及操作条件的重要性质的量。此定义的给出已远远超出原来所固化到人们思想中的钻进参数(钻压、转速、泵量)。因此,21世纪乃至将来的钻井将是科学化、智能化、数字化的钻井。

千米地热井钻井,应从过去传统的、单一的方法中逐渐解脱出来。从目前看,重点要借鉴石油钻井的科学方法,结合地热钻井特性进行钻进参数的优化。钻进参数优选则是指在一定的客观条件下,根据不同参数配合因素对钻进速度的影响规律,采用最优化方法,选择合理的钻进参数配合,使钻进过程达到最优的技术和经济指标。

(一)钻进过程中各参数间的基本关系

钻进过程中的钻压、转速、水力因素、钻井液性能、钻头类型及钻头的牙齿磨损等是影响钻速的主要因素。

1. 钻压对钻速的影响

在钻进过程中,钻头牙齿在钻压作用下吃入地层,破碎岩石、

钻压的大小决定了牙齿吃入岩石的深度和岩石破碎体积的大小，因此钻压是影响钻速的最直接和最显著的因素。关于钻压对钻速的影响，人们进行了长期的研究工作。大量钻进实践表明，在其他钻进条件保持不变的情况下，钻压与钻速的典型曲线如图 3-13 所示。

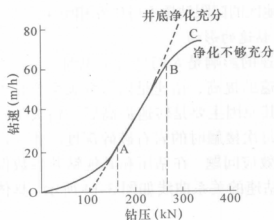


图 3-13 钻压与钻速关系曲线

由图 3-13 可以看出，钻压在较大的变化范围内与钻速是近似于线性关系的。目前在石油实际钻井中通用的钻压取值一般都在图中 AB 这一线性关系范围内变化。这主要是因为：在 A 点之前，钻压太低，钻速很慢；在 B 点之后，钻压过大，岩屑量过多，甚至牙齿完全吃入地层，井底净化条件难以改善，钻头磨损也会加剧，钻压增大，钻速改进效果并不明显，甚至使钻进效果变差。中原地区地热井施工中，由于设备负载、钻具结构等多种原因，钻压及钻速处于 OA 段，导致钻进效率低等。因而，实际应用中，应进行综合治理，实现重型配置（钻压、泵压、泵量），以图中的直线段为依据建立钻压 (W) 与钻速 (v_{PC}) 的定量关系，即

$$v_{PC} \propto (W - M) \quad (3-29)$$

式中 v_{PC} ——钻速, m/h;
 W ——钻压, kN;
 M ——门限钻压, kN。

门限钻压是 AB 线在钻压轴上的截距, 相当于牙齿开始压入地层时的钻压, 其值的大小主要取决于岩石性质, 并具有较强的地区性。不同地区的门限钻压不可以互相引用。

2. 转速对钻速的影响

转速对钻速的影响是人们早就认识到, 并已研究解决了的问题。随着转速的提高, 钻速是以指数关系变化的, 但指数一般均小于 1。其原因主要是转速提高后, 钻头工作刃与岩石接触时间缩短, 每次接触时的岩石破碎深度减小。这反映了岩石破碎时的时间效应问题。在钻压和其他钻井参数保持不变的条件下, 转速与钻速的关系曲线如图 3-14 所示。具体关系式可参考有关资料。

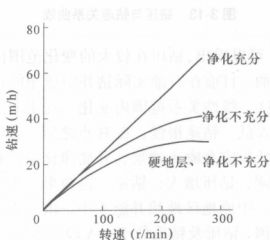


图 3-14 转速与钻速的关系曲线示意图

3. 牙齿磨损对钻速的影响

钻进过程中钻头在破碎地层岩石的同时,其牙齿也受到地层的磨损。随着钻头牙齿的磨损,钻头工作效率将明显下降,钻速也将随之降低。若钻压、转速保持不变,则钻速与牙齿磨损量的关系曲线如图 3-15 所示。其数学表达式参考有关资料。

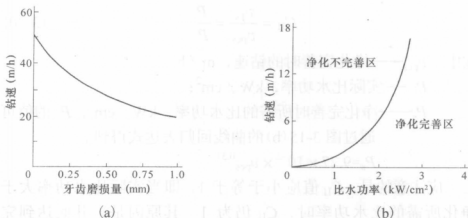


图 3-15 牙齿磨损量与钻速关系曲线示意图

4. 水力因素对钻速的影响

在钻进过程中,及时有效地把钻头破岩产生的岩屑清离井底,避免岩屑的重复破碎,是提高钻速的一项重要手段。井底岩屑的清洗是通过钻头喷嘴所产生的钻井液射流对井底的冲洗来完成的。表征钻头及射流水力特性的参数统称为水力因素。水力因素的总体指标通常用井底单位面积上的平均水功率(称为比水功率)来表示。1975年,AMOCO研究中心发表了钻速与井底比水功率的关系曲线(见图 3-15(b))。图中表明,一定的钻速,意味着单位时间内钻出的岩屑总量一定,而该数量的岩屑需要一定的比水功率才能完全清除,低于这个比水功率

值，井底净化就不完善。若钻进时的实际比水功率落入了图 3-15(b) 的净化不完善区，则实际钻速就比净化完善时的钻速低，如果此时增大比水功率，使井底净化条件得到改善，则钻速会在其他条件不变的情况下而增大。因此，水力因素对钻速的影响主要表现在井底水力净化能力对钻速的影响。水力净化能力通常用水力净化系数 C_H 表示，其含义为实际钻速与净化完善时的钻速之比，即

$$C_H = \frac{v_{pc}}{v_{pcs}} = \frac{P}{P_s} \quad (3-30)$$

式中 v_{pcs} ——净化完善时的钻速，m/h；

P ——实际比水功率，kW/cm²；

P_s ——净化完善时所需的比水功率，kW/cm²， P_s 的值可通过图 3-15(b) 的曲线回归表达式得到

$$P_s = 9.27 \times 10^{-2} \times v_{pcs}^{0.31}。$$

应注意的是， C_H 值应小于等于 1，即当实际比水功率大于净化所需的比水功率时， C_H 仍为 1。其原因是，井底达到完全净化后，比水功率的提高，不会再由于净化的原因进一步提高钻速。

水力因素对钻速的影响还表现为另外一种方式，就是水力能量的破岩作用。当比水功率超过井底净化所需的比水功率后，机械钻速仍有可能增加，水力破岩作用对钻速的影响主要表现为使钻压与钻速关系中的门限钻压降低。

5. 钻井液性能对钻速的影响

大量的试验研究表明，钻井液的密度、黏度、失水量和固相含量及其分散性等，都对钻速有不同程度的影响。具体分析可参考相关资料，这里只给出它们的曲线关系，如图 3-16 所示。

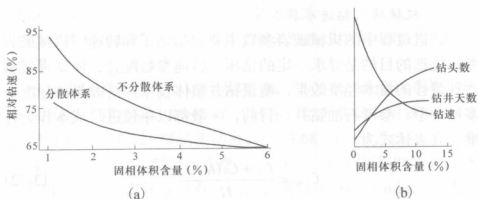


图 3-16 固相含量和分散性对钻速(井)的影响

(二)钻速方程

综合分析考虑各因素对钻速的影响,建立钻速与钻压、转速、牙齿磨损、压差和水力因素之间的综合关系式,即

$$v_{pc} = K_R (W - M) n^\lambda \frac{1}{1 + C_2 h} C_p C_H \quad (3-31)$$

式中 v_{pc} ——钻速, m/h;

W ——钻压, kN;

M ——门限钻压, kN;

n ——转速, r/min;

K_R 、 λ 、 C_2 、 C_H 、 C_p 、 h ——无因次量。

式(3-31)就是石油钻井中人们常说的修正的杨格(Young F.S.)模式。比例系数 K_R 通称为地层可钻性系数,它包含了除钻压、转速、牙齿磨损、压差和水力因素以外其他因素对钻速的影响,它与地层岩石的机械性质、钻头类型以及钻井液性能等因素有关。在岩石特性、钻头类型、钻井液性能和水力参数一定时, K_R 、 M 、 λ 、 C_2 都是固定不变的常量,可通过现场的钻进试验和钻头资料确定,具体计算方法等可参见相关资料。

(三)钻进参数

1. 机械破岩钻进参数

钻进过程中的机械破岩参数主要包括钻压和转速。机械破岩参数优选的目的是寻求一定的钻压、转速参数配合,使钻进过程达到最佳的技术经济效益,衡量钻井整体技术经济效益的标准有多种类型。参考石油钻井,目前,一般都以单位进尺成本作为标准。其表达式为

$$C_{pm} = \frac{C_b + C_r(t_t + t)}{H} \quad (3-32)$$

式中 C_{pm} ——单位进尺成本,元/m;

C_b ——钻头成本,元/只;

C_r ——钻机作业费,元/h;

t_t ——起下钻接单根时间,h;

t ——钻头工作时间,h;

H ——钻头进尺,m。

式(3-32)中的钻头进尺和钻头工作时间与钻进过程中所采用的各参数有关。建立各参数与 H 和 t 的关系,并代入进尺成本表达式,即形成以每米钻井成本表示的钻进目标函数。根据经典的最优化理论,某一函数取得极值的必要条件是:在其定义域内,函数对各变量的偏导数分别等于零。通过大量数字运算证明,对钻进成本函数来讲,符合钻进目标函数极值条件的就是该函数的极小值点。

目标函数、极值条件和约束条件确定后,就可以通过最优化数学方法,求解出在约束条件限定范围内使钻井成本最低的一组最优钻压、最优转速和最优钻头磨损量组合。这里从略,需要时可查阅有关资料。

在实际石油钻井工作中,一般都是根据邻井或同一口井上一个钻头的资料,先确定牙齿或轴承的合理磨损量,然后根据钻机

设备条件确定转速的允许范围,最后求出不同钻压、转速配合时的钻进成本,从中找出最优钻压、转速配合。

为了更好地说明问题,现引用有关资料说明最优钻压及转速组合等。

例:某井段的地层可钻性系数 $K_R=0.002\ 3$, 研磨性系数 $A_f=2.28 \times 10^{-3}$, 门限钻压 $M=10\ \text{kN}$, 转速指数 $\lambda=0.68$ 。用 $\phi 251\ \text{mm}$ 适合于中硬地层的 21 型钻头钻进, $C_2=3.68$, $C_H=1$, $C_P=1$, 钻头成本 $C_b=900\ \text{元/只}$, 钻机作业费 $C_r=250\ \text{元/h}$, 起下钻时间 $t_t=5.75\ \text{h}$; 所用钻机的转盘转速只有三挡, 分别为 $n_1=60\ \text{r/min}$, $n_2=120\ \text{r/min}$, $n_3=180\ \text{r/min}$, 根据邻井资料, 所选钻头在该井段的牙齿磨损量一般为 T6 级 ($h_f=0.75$)。试求最优的钻压、转速组合及其工作指标。

经查表(见文献[3])可知 $\phi 251\ \text{mm}$ 适合于中硬地层的 21 型钻头参数为: $Z_2=6.44$, $Z_1=0.014\ 6$, $a_1=1.5$, $a_2=6.53 \times 10^{-5}$, $C_1=5$ 。经过计算, 结果见表 3-13。

表 3-13 不同转速时的最优钻压及其工作指标

$n\ (\text{r/min})$	60	120	180
$a_1 n + a_2 n^3$	104.105	292.838	650.830
R	15.487	43.563	96.817
R/F	7.183	20.205	44.906
$W_{\text{opt}}\ (\text{kN})$	323.34	285.96	261.73
S	0.138 3	0.295 1	0.567 1
$t_f\ (\text{h})$	15.59	7.31	3.80
J	11.898	16.790	20.179
$H_f\ (\text{m})$	76.57	50.64	31.67
$C_{\text{pm}}\ (\text{元/h})$	81.43	82.23	10.73

注: a_1 、 a_2 是由钻头类型决定的系数, 可查转速影响系数表; 其他符号可查阅文献[3]。

由表 3-13 可见,转速为 120 r/min 和 180 r/min 时的最优钻压都是局部最优值,只有 $n=60\text{ r/min}$ 时的最优钻压才是该设备条件下钻进成本最低的最优转速和最优钻压组合。同时,所确定的钻压还应符合井眼轨迹控制的要求。

通过以上分析可知,中原地区千米地热井施工所需的钻压没有突破门限钻压,加之大部分情况下使用旧的牙轮钻头,更不利于井内工况。要实现中原地区地热井的快速、低耗施工,应加大钻铤的配备重量,使用新的牙轮钻头。钻压控制在 $5\sim 10\text{ kN/in}$ 。只要设备配置能力满足要求,则按石油钻井各参数设置。

2. 水力参数

在钻进过程中,及时地把岩屑携带出来是安全、快速钻进的重要条件之一。把岩屑携带出来要经过两个过程,第一个过程是使岩屑离开井底,进入环形空间;第二个过程是依靠钻井液上返将岩屑带出地面。过去,人们认为第一个过程比较容易实现,第二个过程比较困难。所以,人们的注意力集中在第二个过程上,采取了“大排量冲孔”的技术措施,以便加快岩屑的上返速度。这样钻速确实有一定的提高,但大排量冲孔受到了井壁冲刷问题和地面机泵条件的限制。另外,在实际石油钻井实践中,人们还注意到了一种现象,即钻头水眼被刺坏后,排量并没有减少,而钻速则有明显下降。这一现象提醒人们重新认识这两个过程。经过多年的研究和理论分析,人们认识到实现第二个过程并不很困难,而困难的恰恰是第一个过程。也就是说,把岩屑冲离井底不是容易的事。岩屑不能及时离开井底,这正是影响钻进速度的主要因素之一。为了解决将岩屑及时冲离井底的问题,人们研究出了一种新的工艺技术,即在钻头水眼处安放可以产生高速射流的喷嘴,使钻井液通过钻头喷嘴后以高速射流的方式作用于井底,给予井底岩屑一个很大的冲击力,使其快速离开井底,保持井底干净。同时,在一定条件下,钻头喷嘴所产生的高速射流还可以

直接破碎岩石。这就是钻井工程中经常提到的喷射式钻头和喷射钻井技术。

水力参数优化设计的概念是随着喷射式钻头的使用而提出来的。钻井水力参数是表征钻头水力特性、射流水力特性以及地面水力设备性质的量,主要包括钻井泥浆泵的功率、排量、泵压以及钻头水功率、钻头水力压降、钻头喷嘴直径、射流冲击力、射流喷速和环空钻井液上返速度等。水力参数优化设计的目的就是寻求合理的水力参数配合,使井底获得最优的水力能量分配,要受到钻头喷嘴选择、循环系统水力能量损耗和地面机泵条件的制约。因此,水力参数优化设计是在了解钻头水力特性、循环系统能量损耗规律、地面机泵水力特性的基础上进行的。

1) 喷射式钻头的水力特性

喷射式钻头的水力结构特点就是在钻头上安放具有一定结构特点的喷嘴。钻井液通过喷嘴以后,能形成具有一定水力能量的高速射流,以射流冲击的形式作用于井底,从而清除井底岩屑或破碎井底岩石。

射流及其对井底的作用及射流水力参数和钻头水力参数等,不再赘述,要想进一步了解,可参考石油钻井有关技术资料。

2) 水功率传递的基本关系

钻头水功率是由地面泥浆泵提供的,钻井液从泥浆泵排出时具有一定的水功率,称为泥浆泵输出功率或简称泵功率。水功率从泥浆泵传递到钻头上,是通过钻井液在循环系统中流动实现的。钻井液循环系统总体上可分为地面管汇、钻柱内、钻头喷嘴和环形空间四部分。钻井液流过这四部分时都要消耗部分能量,使压力降低。当钻井液返到地面出口管时,其压力变为零。因此,泵压传递的基本关系式可表示为

$$P_S = \Delta P_g + \Delta P_{st} + \Delta P_a + \Delta P_b \quad (3-33)$$

式中 P_S ——泥浆泵压力, MPa;

ΔP_g ——地面管汇压耗, MPa;

ΔP_{st} ——钻柱内压耗, MPa;

ΔP_a ——环空压耗, MPa;

ΔP_b ——钻头压降, MPa。

根据水力学原理, 水功率是压力和排量的乘积, 泥浆泵输出功率可用下式计算

$$p = P_s \cdot Q \quad (3-34)$$

式中 p ——泥浆泵输出功率, kW;

Q ——泥浆泵排量, L/s。

由于整个循环系统是单一管路, 系统各处的排量应相等。则有

$$p = p_g + p_{st} + p_a + p_b \quad (3-35)$$

式中 p_g ——地面管汇损耗功率, kW;

p_{st} ——钻柱内损耗功率, kW;

p_a ——环空损耗功率, kW;

p_b ——钻头水功率, kW。

由上可知, 在泵压或泵功率一定的条件下, 要提高钻头压降或钻头水功率, 就必须降低地面管汇、钻柱内和环形空间这三部分的压力损耗。通常将这三部分压力损耗统称为循环系统压耗。

3) 循环系统压耗的计算

钻井液在循环系统的流动, 主要是指在钻柱内的管内流动和在钻柱外的环空流动。对流动介质钻井液本身, 根据其流变性不同, 又可分为宾汉流体、幂律流体和卡森流体等不同流型。根据钻井液在管内和环空的流动状态, 又分为层流流动和紊流流动。根据流体力学的基本理论, 不同流型的流体介质在不同的几何空间流动, 其流态的判别方法不同, 且不同流型的流体介质在不同的几何空间以不同的流态流动时, 其压力损耗的计算方法也不同。对循环系统的压力损耗, 如果按严格的流体力学理论计算, 必须首先测定钻井液的流型及性能; 再判断钻井液在循环系统的各个

部分流动时的流态；然后根据不同流型和不同流态下的管内流或环空流的压耗计算公式，计算循环系统各部分的压耗；最后合并求出循环系统总的压耗。

从以上分析可以看出，循环系统压力损耗的计算是一个非常复杂的流体力学问题。这是因为，一方面钻井液是一种非牛顿流体，其流变性变化较大，有多种流型；另一方面钻井循环系统各部分的几何形状不同，在同一排量下，各部分的流态也不相同；且钻井过程中钻柱在井内是旋转的，钻井液在钻柱内和环空的流动并不是纯粹的轴向流动，有些问题在理论上还没有彻底解决。因此，在工程计算上，为应用方便，需在精度允许的范围内对循环系统的流动问题进行适当简化。实际上，在钻井条件下，钻井液在管内的流动总是紊流，环空流动则可能是层流也可能是紊流，但考虑到循环系统压耗的主要组成部分是管内压耗，而环空压耗在数值上较小，整个循环系统全按紊流流态，在工程上可以保证足够的精度。另外，在紊流流态下，钻井液流动的剪切速率较高，高剪切速率条件下不同流型钻井液的流变性比较接近，将钻井液都看做是宾汉流体，在工程计算中也可以达到足够的精度。因此，在循环系统压耗的实际工程计算中，进行了以下假设：①钻井液为宾汉流体；②钻井液在循环系统各部分的流动均为等温紊流流动；③钻柱处于井眼同心的位置；④不考虑钻柱旋转；⑤井筒为已知直径的圆形井眼；⑥钻井液是不可压缩流体。

经过推导(具体推导、变化可参考文献[3])，最终得到的管路循环系统压耗的计算公式为

$$\Delta p_L = (mD + a) Q^{1.8} \quad (3-36)$$

由式(3-36)可以看出，循环系统的压耗随井深的增加而增大。

由以上分析可知，钻井中泥浆泵提供的泥浆压力和水功率主要消耗在钻头和循环系统两部分。因此，提高钻头水力参数的关

键问题，也就是采取何种措施使泥浆泵提供的能量尽量多地传递给钻头，尽量少地消耗在循环系统中。根据有关资料显示，提高钻头水力参数的主要途径有以下几方面：

(1) 提高泵压和泵功率。我国喷射钻井的发展，大体经过了 3 个阶段：第一阶段泵压 13 ~ 15 MPa；第二阶段泵压 17 ~ 18 MPa；第三阶段泵压 20 ~ 22 MPa。

(2) 降低循环系统压耗系数。包括使用低密度钻井液、减小钻井液黏度、适当增大管路内径。对压耗系数影响最显著的是管路内径，在可能的条件下应使用较大直径或内平的钻杆。如 $\phi 114$ 钻杆与 $\phi 127$ 钻杆比较，虽然前者比后者直径小了 13 mm，但可压耗系数的差别很大，在其他条件相同的条件下， $\phi 114$ 钻杆的压耗系数比 $\phi 127$ 钻杆高出 66%。

(3) 增大钻头压降系数（缩小喷嘴直径）。如当喷嘴直径由 12 mm 缩小到 11 mm 时，钻头压降系数可以增加 42%。

(4) 优选排量 Q 。排量 Q 的增大将使钻头压降和钻头水功率增大，但使循环系统压耗和循环系统损耗功率同时增大，因而必须在一定的优选目标下，优选排量，使钻头和循环系统的水力能量分配达到最合理。

4) 泥浆泵的工作特性
泵的额定功率、额定泵压和额定排量的关系为

$$p_r = P_r \cdot Q_r \quad (3-37)$$

式中 p_r ——额定泵功率，kW；

P_r ——额定泵压，MPa；

Q_r ——额定排量，L/s。

当 Q (实际排量) $< Q_r$ 时，由于泵压受到缸套允许压力的限制，即泵压最大只能等于额定泵压 P_r ，此时，泵功率要小于额定泵功率。随着排量的减小，泵功率将下降。泵的这种工作状态称为额定泵压工作状态 (见图 3-17)。

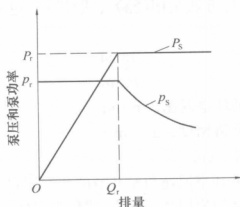


图 3-17 钻井泵的工作状态

当 $Q > Q_r$ 时, 由于泵功率受到额定泵功率的限制, 即泵功率最大只能等于额定泵功率 p_r , 因此泵压要小于额定泵压。随着排量的增加, 泵的实际工作压力要降低。泵的这种工作状态称为额定功率工作状态。

从泵的两种工作状态可以看出, 只有当泵排量等于额定排量时, 泥浆泵才有可能同时达到额定输出功率和缸套的最大许用压力。因此, 在选择缸套时, 应尽可能选择额定排量与实用排量相近的缸套, 这样才能充分发挥泥浆泵的能力。

5) 水力参数优化

分析钻井过程中与水力因素有关的各变量可以看出, 当地面管路、泥浆泵、钻具结构、井身结构、钻井液性能和钻头类型确定以后, 真正对各水力参数大小有影响的可控制参数就是钻井液排量和钻头喷嘴直径。

(1) 确定最小排量 $Q_a^{[4]}$ 。

最小排量是指钻井液携带岩屑所需要的最低排量, 只要确定了携岩所需的最低钻井液环空返速, 也就确定了最小排量。确定最小环空返速的方法有多种, 一种方法是根据现场工作经

验来确定，另一种方法是用经验公式计算。通常使用的经验公式为

$$v_a = \frac{18.24}{P_d \cdot d_h} \quad (3-38)$$

式中 v_a ——最低环空返速，m/s；

P_d ——钻井液密度，g/cm³；

d_h ——井径，cm。

实质上，最低环空返速与钻井液的环空携岩能力有关，钻井液的携岩能力通常用岩屑举升效率(或称为岩屑运载比)来表示。岩屑举升效率是指岩屑在环空的实际上返速度与钻井液在环空的上返速度之比，即

$$K_s = v_s / v_a \quad (3-39)$$

式中 K_s ——岩屑举升效率，无因次；

v_s ——岩屑在环空的实际上返速度，m/s；

v_a ——钻井液在环空的平均上返速度，m/s。

在施工中为了保持钻进过程中产生的岩屑量与井口返出量相平衡，一般要求 $K_s \geq 0.5$ 。因此，在用经验公式确定了最低环空返速以后，还应对岩屑举升效率进行计算，以确信 $K_s \geq 0.5$ 。

为计算 K_s ，需求出岩屑的实际上返速度 v_s 。设岩屑在钻井液中的下滑速度为 v_{sl} ，则 $v_s = v_a - v_{sl}$ 。岩屑的下滑速度与钻井液的性能有关，其计算公式为

$$v_{sl} = \frac{0.0707 d_s (\rho_s - \rho_d)^{2/3}}{\rho_d^{1/3} \cdot \mu_e^{1/3}} \quad (3-40)$$

式中 v_{sl} ——岩屑在钻井液中的下滑速度，m/s；

d_s ——岩屑直径，cm；

ρ_s 、 ρ_d ——岩屑、钻井液密度，g/cm³；

μ_e ——钻井液有效黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$, 通过有关公式计算可得。

根据以上公式求出的 K_s 若大于 0.5, 则所确定的环空最低返速可用; 若 $K_s < 0.5$, 则需要适当调整钻井液性能或适当调整最低环空返速的值, 以确保 $K_s \geq 0.5$ 。

最低返速确定以后, 即可根据下式确定携岩所需的最小排量

$$Q_a = \frac{\pi}{40} (d_h^2 - d_p^2) V_a \quad (3-41)$$

式中 Q_a ——最小排量, L/s ;

d_h ——井径, cm ;

d_p ——钻柱直径, cm 。

(2) 计算不同井深时的循环系统压耗系数。

根据钻孔结构, 将全井分为若干井段, 用每个井段最下端处的井深作为计算井深。根据有关公式分别计算, 最后计算不同井深时的循环系统压耗系数 K_L (具体可参考有关资料)。

(3) 选择缸套直径。

泥浆泵的每一级缸套都有一个额定排量, 在所选缸套的额定排量 Q_r 大于携带岩屑所需的最小排量 Q_a 的前提下尽量选用小尺寸缸套。缸套直径确定以后, p_r 、 Q_r 、 P_r 三个额定参数就确定了。需要注意的是, 应根据所选用缸套的允许压力和整个循环系统 (包括地面管路、高压管、水龙头等) 耐压能力的最小值, 确定钻井过程中泥浆泵的最大许用压力 P_r 。

(4) 排量、喷嘴直径及各项水力参数的计算和确定。

在确定排量之前先要选择水力参数优选的标准; 根据所选择的优选标准计算第一和第二临界井深; 根据优先标准及临界井深和获得最大水力参数的条件, 计算各井段所用的排量和喷嘴直径; 同时, 计算出不同井段可获得的射流参数和钻头水力参数 (具体可参考有关资料)。

综上所述：目前，中原地区地热井的施工，在钻进工艺上存在很多不合理因素；现在所采用的钻具、钻孔结构、钻压、泵压、泵量、钻头等，充其量称之为“模拟”石油钻井技术。因此，对于广大技术人员来讲，首先应从思想上认识到目前地热井施工中存在的严重不足；其次，在条件逐渐改变的情况下，应完善并优化设备配置，实现科学钻井，达到生产效率最大化，综合钻井成本最低化。

第三节 钻井液

众所周知，没有钻井液，钻井作业就不能正常进行，故有人把钻井液比喻为钻井的血液，这一点儿都不过分。钻井液与钻井速度和钻井成本密切相关，钻井液的性能是关系到钻井成败的重要因素之一，这在高温(高压)地热井施工中尤为明显。因此，钻井液在钻井过程中的重要性是显而易见的，每一个钻井工程技术人员有必要对它有所了解、有所掌握，以利于钻井液在钻井过程中更好地发挥作用。

一、钻井液的性能

(一)定义与功用

1. 定义

钻井时用来清洗井底并把岩屑携带到地面、维持钻井操作正常进行的流体称为钻井液。

2. 功用

(1)清除井底岩屑。

(2)冷却和润滑钻头及钻柱。

(3)造壁性能。

(4)控制地层压力。

(5)循环停止时悬浮钻屑等,防止下沉。

(6)从所钻地层中获得信息。

(7)传递水力功率。

(二)组成与分类

1. 组成

随着地热钻井技术的发展,钻井液的种类越来越多,一般由下列物质组成:

(1)液相。是地热钻井中钻井液的连续相,主要为水。

(2)活性固相。是指人为加入的造浆材料。

(3)惰性固相。是指不溶于钻井液的细微骨架材料。

(4)各种添加剂。根据要求,加入到钻井液中的调整钻井液性能的材料。

2. 分类

(1)中低温钻井液。钻井液抗井底温度小于 100°C 。

(2)高温钻井液。钻井液抗井底温度大于 100°C 。

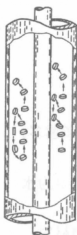
(三)钻井液的性能

1. 密度

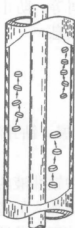
密度是指单位体积钻井液的质量,单位为 kg/m^3 或 g/cm^3 。它是钻井液的重复性能参数,合适的密度用于平衡地层压力、防止井壁坍塌。为了提高钻速,在地层条件允许的情况下,尽可能使用低密度的钻井液(其他参数可参考有关资料)。

2. 流变性能与钻井工程的关系^[4]

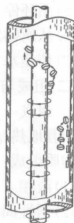
钻井液流变性与钻井工程关系十分密切。层流和紊流都不利于岩屑的携带,改性层流有利于岩屑携带(见图 3-18),使井眼净化,对井壁的冲刷较轻,这就要求动塑比 ζ/μ_{pv} 在 $0.34\sim 0.48$ 的范围内(或流性指数 $n=0.4\sim 0.7$)。 ζ/μ_{pv} 值小了导致尖锋型层流,引起岩屑转动, ζ/μ_{pv} 值过大,则钻井液结构太强,增大泵压。



片状岩屑在层流
时上升的情况
(钻柱不动)



片状岩屑在紊流
时上升的情况
(钻柱不动)



旋转钻柱对片状
岩屑在层流中上
升的影响

图 3-18 岩屑运动状态

钻井液具有剪切稀释特性(表观黏度随剪切速率增大而降低的现象),在钻头水眼处紊流摩阻小,有利于提高钻速,而在环空中有利于岩屑的悬浮等。但剪切力又不能过大,否则将影响开泵和产生压力激动等。

不同地区、不同钻井液类型对流变参数值的要求不一样,可根据实际情况灵活运用。

3. 钻井液的造壁性及降滤失剂

1) 滤失和造壁过程

当钻头钻穿带孔隙的渗透性地层时,由于一般情况下钻井液的静液柱压力总是大于地层压力,钻井液中的液体在压差的作用下便向地层内渗滤,这个过程称为钻井液的滤失。在钻井液产生滤失的同时,在井壁表面形成一层固体颗粒胶结物——滤饼。滤饼形成的过程是先由较大的颗粒将大孔堵塞一部分,然后次大的颗粒堵塞大颗粒之间的孔隙,依次下去,孔隙越堵越小。一般说

来, 所形成滤饼的渗透率比地层本身的渗透率小几个数量级。所以, 形成的滤饼阻止滤液向地层渗透, 同时又有保护井壁的作用, 故滤饼在井壁上的形成过程称为造壁过程。

2) 几种滤失的概念

根据钻井过程的不同时期, 有不同的滤失情况。

(1) 瞬时滤失。

钻头刚破碎井底岩石形成井眼的那一瞬间, 钻井液便迅速地向地层孔隙渗透。在滤饼尚未形成的一段时间内的滤失称为瞬时滤失。当我们做静滤失试验时, 刚打开通气阀测量筒中收集到的液体就是瞬时滤失量。瞬时滤失有利有弊。瞬时滤失有利于提高钻速, 但钻开目的层时, 瞬时滤失使储层受到损害, 降低含水层的渗透率, 此时应设法控制瞬时滤失。

影响瞬时滤失的因素包括地层孔隙大小、钻井液中固相含量及颗粒尺寸分布、钻井液及滤液黏度等。对于目的层, 为了降低瞬时滤失量, 采用屏蔽暂堵技术, 即根据架桥颗粒的直径为目的层孔径的 $1/2 \sim 2/3$ 架桥原理, 在钻井液中加入架桥颗粒, 同时加入变形物质, 以封堵架桥颗粒间的缝隙。此外, 还有单向压力暂堵剂, 常用的有改性纤维素和各种粉碎为极细的改性果壳、改性木屑等。后者在压差作用下进入地层, 堵塞孔隙; 当在目的层使用时, 地层压力大于井内液柱压力, 在反向压差作用下, 将单向压力暂堵剂从孔隙中排出, 实现解堵。

(2) 动滤失。

随着钻井过程的进行, 瞬时滤失后很快在井壁上形成一层滤饼, 滤饼不断增厚、加固; 同时形成的滤饼又受到钻井液的冲刷和钻柱的碰撞、刮挤, 使滤饼遭到破坏。当滤饼的形成(或沉积)速度等于被冲刷(破坏)的速度时, 滤饼达到不变的厚度, 滤失速率也保持不变。钻井液在井内循环流动时的滤失过程称为动滤失。动滤失的特点是滤饼薄、滤失量大。它除了受地层条件、压差、

钻井液中固相类型和含量及黏度影响外，钻井液的流变参数与动滤失密切相关，平衡滤饼的厚度与钻井液的流速与流态有关。流速越高，滤饼冲蚀越严重，滤饼就薄，滤失量就越大。紊流对滤饼的冲蚀比层流严重，故滤失量较层流时大。

(3) 静滤失。

在起下钻或处理钻井事故时，钻井液停止了循环，井壁上的滤饼不再受冲蚀，随着滤失过程的进行，滤饼阻力逐渐增大，滤失速率不断降低，滤失量逐渐减小。钻井液在停止循环时的滤失过程称为静滤失。与动滤失过程相比，静滤失过程比较简单，研究也比较成熟。一般说的滤失量都是指静滤失。

(4) 影响静滤失量的因素。

因井壁上形成滤饼的厚度比井眼直径的尺寸小得多，可以认为滤失过程是线性的，借助于达西公式推导出下面的静滤方程

$$V_f = A \sqrt{\frac{K(C_c / C_m - 1) \Delta P \times t \times 10}{\mu}} \quad (3-42)$$

式中 V_f ——钻井液的滤失量，mL；

A ——过滤面积， cm^2 ；

K ——滤饼的渗透率；

C_c ——滤饼中固相含量(以体积计)，%；

C_m ——钻井液中固相含量(以体积计)，%；

ΔP ——压差，MPa；

t ——滤失时间，min；

μ ——钻井液滤液黏度， $\text{MPa} \cdot \text{s}$ 。

3) 降滤失剂及其作用机理

控制滤失量最好的办法是降低滤饼的渗透性。降滤失剂就有降低滤饼渗透性的作用。它主要通过以下几种途径起作用。

(1) 护胶作用。

为了形成渗透率低的滤饼，要求固相颗粒在多级分布的同时

还要有适当多的溶胶颗粒。降滤失剂的作用在于：一方面能吸附在黏土颗粒表面形成吸附层，以防止黏土颗粒絮凝变粗；另一方面能把在钻井液循环搅拌作用下所拆散的细颗粒吸附在分子链上，不再黏结成大大颗粒。这样大大增加了细颗粒的比例，使钻井液形成薄而致密的滤饼，从而降低滤失量。这称之为降滤失剂的护胶作用。

(2) 增加钻井液中黏土颗粒的水化膜厚度，降低滤失量。

从静滤失公式可知，如果在其他条件不变的情况下，能增加钻井液中黏土颗粒的变形能力和降低滤饼中固相体积百分含量，则 C_c / C_m 值减小，滤失量会降低。由于降滤失剂吸附在钻井液中的黏土颗粒上，使其水化程度增加，因此黏土颗粒周围的水化膜增厚，使形成的滤饼在压差作用下容易变形，滤饼的渗透率降低。

(3) 提高滤液黏度，降低滤失量。

从静滤失公式可知，滤失量与钻井液滤液黏度的 $1/2$ 次方成反比，有机降滤失剂大多是长链化合物，加入钻井液中都使滤液黏度增加，有利于降低滤失量。

(4) 降滤失剂分子自身的堵孔作用。

大部分有机聚合物降滤失剂的分子尺寸在胶体颗粒的范围内，加入这些处理剂就增加了钻井液中胶体颗粒的含量，它们对滤饼起堵孔作用。这些大分子以两种方式参加堵孔：一种方式就是分子的长链楔入滤饼的孔隙中；另一种方式是长链分子卷曲呈球状，堵塞滤饼的微孔隙，使滤饼薄而致密，从而降低滤失量。

常用的降滤失剂有：Na-CMC(羧甲基纤维素钠盐)、SMP(磺化酚醛树脂)、 NH_4HPAN (水解聚丙烯腈铵盐)、Na-HPAN(水解聚丙烯腈钠盐)、Ca-HPAN(水解聚丙烯腈钙盐)、SPNH(磺化褐煤树脂)及 PAC 系列产品。

二、钻井液的配制

对于每一眼地热井，都必须按照一定的配方，使用各种配浆原材料和化学处理剂配制成所需要的钻井液，或者将它们添加到正在使用的钻井液中，以随时调整和维护钻井液的性能。一般来讲，钻井液配浆原材料是指在配浆中用量较大的基本组分，例如膨润土、水等。处理剂则是指用于改善和稳定钻井液性能，或为满足钻井液某种性能需要而加入的化学添加剂。处理剂是钻井液的核心成分，往往很少的加量就会对钻井液性能产生极大的影响。

(一)配浆原材料

1. 膨润土

目前我国将配制钻井液所用的膨润土分为 3 个等级：一级为符合 API 标准的钠膨润土；二级为改性土，经过改性符合 OCMA 标准要求；三级为较次的配浆土，仅用于性能要求不高的钻井液。

膨润土在淡水钻井液中具有以下作用：①增加黏度和切力，提高井眼净化能力；②形成低渗透率的致密泥饼，降低滤失量；③对胶结不良的地层，可改善井眼的稳定性；④防止井漏。

2. 加重材料

加重材料又称加重剂，由不溶于水的惰性物质经研磨加工制备而成。为了对付高压地层和稳定井壁，需将其添加到钻井液中，以提高钻井液的密度。

对于某一给定的钻井液体系，加重前、后的体积关系可用下式表示

$$V_2 = V_1 + V_B = V_1 + M_B / \rho_B \quad (3-43)$$

式中 V_1 、 V_2 、 V_B ——加重前、后的钻井液及加重剂的体积；

M_B ——加重剂的质量；

ρ_B ——加重剂的密度。

钻井液在加重前、后的质量关系可表示为

$$\rho_2 V_2 = \rho_1 V_1 + M_B \quad (3-44)$$

式中 ρ_1 、 ρ_2 ——加重前、后的钻井液密度。

由以上两式可得

$$V_2 = V_1 (\rho_B - \rho_1) / (\rho_B - \rho_2) \quad (3-45)$$

$$M_B = (V_2 - V_1) \rho_B \quad (3-46)$$

说明：有时因受现场泥浆池容量的限制，加重前必须排掉一部分钻井液。这种情况下，首先根据加重后可以容纳的体积 V_2 ，用式 $V_1 = V_2 (\rho_B - \rho_2) / (\rho_B - \rho_1)$ 求出应保留的原浆的体积，之后再 用式 (3-46) 求出加重剂用量。

钻井液加重后，对低密度固相的容纳量会大大降低。因此，为了减少加重钻井液的维护费用，加重前应尽可能降低低密度固相的含量。为此，有时在加重之前采取加水稀释的措施。此时加重前、后钻井液的体积关系可用下式表示

$$V_2 = V_1 + V_w + M_B / \rho_B \quad (3-47)$$

式中 V_w ——稀释水的体积；

其他符号含义同前。

加重前后钻井液的质量关系如下

$$\rho_2 V_2 = \rho_1 V_1 + \rho_w V_w + M_B \quad (3-48)$$

低密度固相的原体积分数 f_{c1} 与所要求达到的新体积分数 f_{c2} 之间存在如下关系

$$f_{c2} V_2 = f_{c1} V_1 \quad (3-49)$$

由以上三式联立可得

$$V_1 = V_2 (f_{c2} / f_{c1}) \quad (3-50)$$

$$V_w = [(\rho_B - \rho_2) V_2 - (\rho_B - \rho_1) V_1] / (\rho_B - \rho_w) \quad (3-51)$$

$$M_B = (V_2 - V_1 - V_w) \rho_B \quad (3-52)$$

3. 水

水是配制各种钻井液时不可缺少的基本组分。钻井液的性能与配浆水的水质密切相关。因此，配制钻井液时，必须预先了解

配浆水的水质，不合格的水须经过适当处理后才能使用。

(二) 泥浆配制

地热井施工钻井液配制，根据所钻遇地层特性及有利于井眼质量、提高钻速等来设计。

1. 配浆程序

配浆(见图 3-19)程序为：配制基浆→加入处理剂→调整 pH 值→测试泥浆性能→达到所要求。



图 3-19 泥浆配制

2. 膨润土及水量计算

$$M_c = [\rho_c V_m (\rho_m - 1)] / (\rho_c - 1) \quad (3-53)$$

$$V_w = V_m \rho_m - M_c \quad (3-54)$$

式中 M_c ——所需膨润土的质量，t；

ρ_c ——膨润土密度， g/cm^3 ；

V_m ——所配制钻井液的体积， m^3 ；

ρ_m ——原浆密度， g/cm^3 ；

V_w ——所需水量， m^3 。

(三) 泥浆类型选择

地热井施工，对于泥浆的选择除了满足一般钻井所具备的钻井液性能之外，最重要的是，钻井液性能要经受住井底温度的影响。对于中低温地热井而言，一般的钻井液可满足其要求，但对于高温($>150^\circ\text{C}$)的井底温度，主要考虑泥浆性能的抗高温。在

此介绍不分散低固相聚合物钻井液的性能参数。

所谓“不分散”具有两个意义：一是指组成钻井液的黏土颗粒尽量维持在 $1 \sim 30 \mu\text{m}$ 范围内，不要向小于 $1 \mu\text{m}$ 的方向发展；二是指混入钻井液体系的钻屑不容易分散变细。所谓“低固相”是指低密度固相（主要指黏土矿物类）的体积分数要在钻井工程允许的范围内维持到最低。

(1) 固相含量（主要是指低密度的黏土和钻屑，不包括加重剂）应维持在 4%（体积数）或更小，大约相当于密度小于 1.06 g/cm^3 。这是核心指标，是提高钻速的关键，应尽力做到。

(2) 钻屑与膨润土的比例不超过 2 : 1。实践证明，虽然钻井液中的固相越少越好，但如果完全不要膨润土，则不能建立钻井液所必需的各项性能，特别是不能保证净化井眼所必需的流变性能，以及保护井壁和减轻含水层污染所必需的造壁性能。所以，应含有一定量的膨润土，其加量在保证建立上述各项钻井液所必需性能的前提下越低越好。一般认为不能少于 1%，1.3% ~ 1.5% 比较合适。

(3) 动切力 (Pa) 与塑性黏度 ($\text{MPa} \cdot \text{s}$) 之比控制在 0.48 左右。这是为了满足低返速（如 0.6 m/s ）携砂的要求，保证钻井液在环形空间实现平板型层流而规定的。

(4) 非加重钻井液的动切力应维持在 $1.5 \sim 3.0 \text{ Pa}$ 。动切力是钻井液携带钻屑的关键参数，为保证良好的携带能力，首先必须满足动切力的要求。

(5) 滤失量控制应视具体情况确定。在稳定井壁的前提下，可适当放宽，以利提高钻速。在易坍塌地层，应当从严控制。进入开采层后，为减轻污染也应严格控制。

(6) 优化流变参数，若采用卡森模式，要求极限高剪切黏度 $\eta_{\infty} = 3 \sim 6 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ ， $\tau_c = 0.5 \sim 3 \text{ Pa}$ ； I_m （剪切稀释指数）= 300 ~ 600。

(7) 在整个钻井过程中应尽量不用分散剂。

比较理想的不分散低固相聚合物钻井液的性能见表 3-14。

表 3-14 不分散低固相聚合物钻井液的典型性能

密度 (g / cm ³)	固相 含量 (g / L)	膨润土 含量 (g / L)	岩屑：膨润土	动切力 (Pa)	塑性 黏度 (MPa · s)	动塑比 (Pa / (MPa · s))
1.03	57.0	28.5	1 : 1	1.5	3	0.5
1.04	77.0	34.2	1.3 : 1	2.0	4	0.5
1.05	96.9	39.5	1.4 : 1	2.0	6	0.4
1.07	116.9	42.8	1.7 : 1	2.5	8	0.4
1.08	136.8	45.8	2 : 1	3.0	10	0.3

中原地区千米地热井施工，除参考表 3-14 泥浆性能外，随着地热井向高温开发，现推荐一种暂储型钻井液。

根据钻井周期的需要，通过对材料配方的调整来控制钻井液流变性等参数随时间变化特性，满足钻井液在钻井期间具有强的护壁堵漏效果，而在成井后开采时，又使近井地层中侵入的钻井液黏度下降，体积骤减，强度脆化，从而使地下流体通道畅通，地层的渗透性恢复，提高生产井的产量^[23]。

暂堵型钻井液的基本原理是：通过选择特殊的复配生物酶制剂和相应的化学试剂，添加到 Na-CMC、胍尔胶和魔芋等聚合物溶液中。生物酶制剂作为生物催化剂，控制聚合物由长链大分子变成了短链小分子的降解速度。在钻进工作结束后，聚合物分子由长链变成短链，钻井液黏度以人为可控的方式自动下降。随着钻井液的黏度下降，先前形成的泥皮自动破除，产层孔隙中的阻塞物消除，流体的流动性增强，这样就可以恢复井周地层的渗透性，达到提高油气井、地热井产量的目的。

。暂堵型钻井液将生物酶技术应用于钻探领域,使得钻井液的性能具有人为可调控性。新型暂堵型钻井液能自动降解,对地层无污染、无伤害,地层的渗透性恢复达到 90%以上,相对于常规钻井液,能明显地提高水井的产量。同时,该新型暂堵型钻井液的其他常规技术指标(如黏度、失水量、稳定性、润滑性和抑制性等)均达到相应优质泥浆的技术标准,尤其在钻井期间的护壁堵漏性能尤为突出。

暂堵型钻井液已经应用于生产实际,在甘肃张掖和广西柳州共进行了多口水井的现场试验工作。不仅解决了复杂地层护壁堵漏难的问题,使钻进工作顺利进行,而且显著地提高了水井的产量。

通过在抗高温技术上的进一步研究,暂堵型钻井液即可以应用于油气田开发中。

三、钻井液固相控制^[5]

钻井液中的固相按其作用可分为两类:一类是有用固相;另一类是无用固相,如钻屑、劣质土和砂粒等。钻井实践表明,过量无用固相的存在是破坏钻井液性能,降低钻速,并导致各种井下复杂情况的最大隐患。所谓钻井液固相控制就是指在保存适量有用固相的前提下,尽可能地清除无用固相。正确、有效地进行固相控制可以降低钻井扭矩和摩阻,减小环空抽吸的压力波动,减少压差卡钻的可能性,提高钻井速度,延长钻头寿命,减轻设备磨损,改善下管条件,增强井壁稳定性,保护开采层,以及减少钻井液费用,从而为科学钻井提供必要的条件。一位钻井液专家曾讲过:如果固控设备发生故障,应立即停止钻进,直到固控设备修好后再重新钻进。可见钻进过程中固控的重要性,即所谓泥浆是钻井的血液。

(一)固相控制方法

按照美国石油学会(API)制定的标准,钻井液中的固相可按其

粒度大小分为三大类：

- (1) 黏土(或称胶粒) 粒径 $< 2\ \mu\text{m}$;
- (2) 泥 粒径 $2 \sim 73\ \mu\text{m}$;
- (3) 砂(或称 API 砂) 粒径 $> 74\ \mu\text{m}$ 。

常用的固相控制方法有以下三种(见图 3-20)。

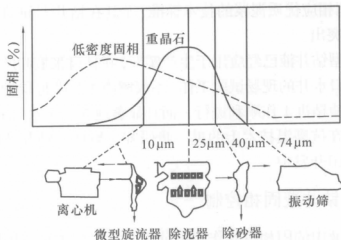


图 3-20 各种固控设备可分离固体颗粒的粒度范围

1. 机械固控法

通常用于钻井液固控的设备有振动筛、旋流器和离心分离机三大类。机械设备清除固相不增加钻井液体积，不必补加大量处理剂，故有利于降低钻井液成本。同时对钻井液的性能影响小，有利于井下正常钻进。

1) 振动筛

振动筛(见图 3-21)是利用高频振动作用将流经筛布上的钻井液实现固相分离，即颗粒直径大于筛孔的固相颗粒通不过筛孔而从筛网上向前移动，而小于筛孔直径的固相颗粒连同钻井液，通过筛网而流入钻井液槽中。

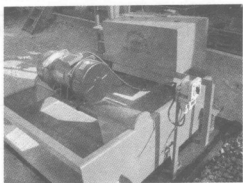


图 3-21 振动筛

振动筛的筛布有多种孔眼型号，应根据返出钻井液中岩屑及固相的尺寸、各种尺寸固相的百分含量来选择合适目数的筛网。目前常用的振动筛规格如表 3-15 所示。

现场资料表明，使用 12 目粗筛网最多只能清除钻井液中固相的 10%。为了使更多、更细的钻屑得以清除，应使用 80~120 目的细筛网。或者，采用上层粗、下层细的双层或多层筛网重叠使用。

使用振动筛时还应注意以下几点：

- (1) 正确地安装与操作。
- (2) 筛网的张紧程度要适当，否则筛网寿命会大大缩短。
- (3) 网孔尺寸以钻井液覆盖筛网总长度的 75%~80%为宜。
- (4) 安装上水管线，及时清洗筛网，防止堵塞。

2) 旋流器

旋流器在离心力的作用下，将较粗的颗粒从钻井液中分离出来。按被分离颗粒的大小不同(见表 3-16)，又分为：

(1) 旋流除砂器(见图 3-22)：分离固相颗粒直径一般在 $74\ \mu\text{m}$ 以上(也可分离少部分 $40\sim 74\ \mu\text{m}$ 的固相颗粒)。

(2) 旋流除泥器：分离 $10\sim 74\ \mu\text{m}$ 的固相颗粒(大部分在 $20\sim 40\ \mu\text{m}$ 范围)。

表 3-15 钻井中常用的振动筛筛网规格

网孔尺寸 (mm)	金属丝直径 (mm)	筛分面积百分比 (%)	相当于英制目数 (目 / in)
2.00	0.500	64	10
	0.450	67	
1.60	0.500	58	12
	0.450	61	
1.00	0.315	58	20
	0.280	61	
0.560	0.280	44	30
	0.250	48	
0.425	0.224	43	40
	0.200	46	
0.300	0.200	36	50
	0.180	39	
0.250	0.160	37	60
	0.140	41	
0.200	0.125	38	80
	0.112	41	
0.160	0.110	38	100
	0.090	41	
0.140	0.090	37	120
	0.071	41	
0.112	0.056	44	150
	0.050	48	
0.110	0.063	38	160
	0.056	41	
0.075	0.050	36	200
	0.045	39	

(3) 微型旋流分离器：分离 5 ~ 10 μm 的固相颗粒，可从钻井液中分离出膨润土。

表 3-16 各种尺寸旋流器可分离的固相颗粒范围

旋流器直径(mm)	50	75	100	150	200
可分离颗粒直径(μm)	4 ~ 10	7 ~ 30	10 ~ 40	15 ~ 52	32 ~ 64

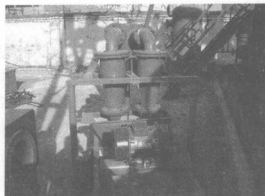


图 3-22 振动筛与除砂器组合

3) 离心分离机

在离心力作用下，钻井液中质量大的固相颗粒被甩到旋转筒(外壳)壁沉降下去，然后靠螺旋输送器将堆积起来的固相颗粒推至离心机端部，从端部的孔眼排出，而钻井液从离心机另一端排液孔排出。

离心机主要作用有：

(1) 清除非加重钻井液中的固相，在这种情况下离心机相当于清除 2 ~ 5 μm 以上的粗颗粒，主要是淤泥尺寸范围的颗粒。

(2) 从加重钻井液中回收加重剂等。

2. 稀释法

稀释法既可用清水或其他较稀的流体直接稀释循环系统中的钻井液，也可在泥浆池容量超过限度时用清水或性能符合要求的新浆，替换出一定体积的高固相含量的钻井液，使总的固相含量降低。稀释法虽然操作简便，见效快，但在加水的同时必须补充

足够的处理剂。为了尽可能降低成本，一般应遵循以下原则：

①稀释后的钻井液总体积不宜过大；②部分旧浆的排放应在加水稀释前进行，不要边稀释边排放；③一次性多量稀释比多次少量稀释的费用要少。

3. 化学絮凝法

化学絮凝法(见图 3-23)是在钻井液中加入适量的絮凝剂，使某些细小的固体颗粒通过絮凝作用聚结成较大颗粒，然后用机械方法排除或在沉砂池中沉除。这种方法是机械固控的补充，两者相辅相成。目前广泛使用的不分散聚合物钻井液体系正是依据这种方法，使其总固相含量保持在所要求的 4% 以下。化学絮凝法还可用于清除钻井液中过量的膨润土。由于膨润土的最大粒径在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 左右，而离心机一般只能清除粒径 $6\text{ }\mu\text{m}$ 以上的颗粒。因此，用机械法无法降低钻井液中膨润土的含量。化学絮凝总是安排在钻井液通过所有固控设备后进行。



图 3-23 化学絮凝

为达到有效的固相控制，必须将三种方法综合使用，大多数情况下，使用机械法控制固相。因此，必须将固控设备配套使用，其清除固相的流程必须按振动筛→除砂器→除泥器→离心机和微型旋流器顺序布置。如果只使用其中的部分设备，则达不到好的固控效果。

(二)钻井液的管理

(1) 日常维护处理前,首先测定钻井液性能,以确定处理方案。

(2) 若钻井液密度、黏度过高,应先采用机械处理,再作其他方法的处理。

(3) 日常维护处理应在钻井过程中,在钻井液循环槽内进行,严禁突然大量加入清水稀释钻井液,禁止在循环中断的情况下进行大处理。

(4) 每班至少测量钻井液有关参数一次,做到钻井时除砂设备常开,勤捞砂,勤维护,避免钻井液性能大幅度变化;钻进时注意观察钻井液颜色、温度等变化。

(5) 孔内出现复杂情况时(如坍塌、漏失、起下钻遇阻等)应及时采取相应的钻井液对策。

(6) 正常钻进过程中,必须调整好钻井液参数,做到密度、黏度、失水量等满足要求。

(7) 钻井液处理剂、测定仪器以及有关设施器具的保管、使用、维护等工作应有专人负责。

(8) 雨天时,保护好钻井液,禁止雨水流入钻井液池内。

(9) 做好废旧钻井液的处理工作,防止污染环境。

四、防漏与堵漏^[15]

钻井液漏失是钻井过程中一种常见的井下复杂情况。地热钻井中,井漏可以发生在浅、中及深层中,也可以发生在不同的地质年代,如从第四系直到古生界中发生,而且各类岩性的地层中都可能出现。一旦发生漏失,不仅延误钻井时间,损失钻井液,损害目的层等,而且还可能引起井塌、卡钻等一系列复杂情况,甚至导致井眼报废,造成重大的经济损失。

(一)漏失的分类

漏失在各种岩性的地层中均可能发生。如黏土岩、砂砾岩、

碳酸盐岩、岩浆岩、变质岩等。按漏失速度可将漏失分为 5 类，见表 3-17。对于孔隙型地层，其中微漏和小漏又可称为渗滤性漏失，中漏和大漏又可称为部分漏失，全部失返的情况则称为完全漏失。在钻进中漏速十分容易测定，依据它可以较直观地了解漏失的严重程度。

表 3-17 按漏速进行分类的原则

漏失级别	1	2	3	4	5
漏速 (m^3/h)	<10	$10 \sim 20$	$20 \sim 50$	>50	全部失返
程度描述	微漏	小漏	中漏	大漏	严重漏失

(二)井漏的预防

地热钻井中，往往漏失层很可能就是目的层，钻进中虽不希望井漏，但在正常情况下，井不漏反而担心目的层是否有水存在。因此，钻进中的防漏与后期成井后的解堵显然是一对矛盾。

对付井漏应坚持以“预防为主”的原则，尽可能地避免因人为失误而引起的井漏。

- (1) 设计合理的井身结构。
- (2) 降低井筒中钻井液的动压力。
- (3) 提高地层的承压能力。

(三)井漏的处理^[6]

1. 堵漏原理

当漏失为非目的层时，为了堵住漏层，必须加入各种堵漏材料，使之在距井筒很近范围的漏失通道里建立一道堵塞隔墙，用以隔断钻井液的通道。各种堵漏材料按下述步骤在漏层建立堵塞隔墙：

- (1) 当堵漏材料到达漏层时，其固相颗粒的形状、尺寸、浆液的流变性能等都要适应漏失通道的复杂形态，这样才能按设计的

数量进入漏层。

(2) 堵剂进入漏层后, 不能让其源源不断地进入地层深处。进入地层的堵剂必须能抵御各种流体充填物的干扰。在各种流动阻力的作用下, 使之在近井筒漏失通道的某处发生滞流、堆集而充满一定范围的漏失通道空间。

(3) 充满一定范围漏失空间的堵剂, 在高温、压差或化学反应等作用下, 与漏失通道有比较牢固的黏结强度, 才能有效地封堵住漏层, 不至于发生暂堵现象。

(4) 对于目的层, 要进行暂堵, 不能形成永久封闭状态。

2. 处理井漏程序

(1) 分析井漏发生的原因, 确定漏层位置、类型及漏失严重程度。

(2) 施工前要进行科学的施工设计, 精心施工。

(3) 如果条件许可, 应尽可能强钻一段, 确保漏层完全被钻穿, 以免重复处理同样的问题, 增加处理时间。

(4) 施工时如果能起钻, 应尽可能使用光钻具, 下至漏层顶部。

(5) 使用正确的堵剂注入方法, 确保 $2/3$ 的堵剂进入漏层近井筒处。

(6) 施工过程中要不断地活动钻具, 避免卡钻。

3. 堵漏方法

常用的堵漏方法有以下几种。

1) 调整钻井液性能与钻井措施

采用降低钻井液密度、调整流态和泵量及改变开泵措施等方法, 降低井内液柱压力, 减小激动压力和环空压耗, 改变钻井液在漏失通道中的流动阻力, 减少地层产生诱导裂缝的可能性。此方法一般用于封堵渗透性孔隙地层的漏失。

2) 静止堵漏

静止堵漏是在发生完全或部分漏失的情况下, 将钻具起出漏

失井段，或起至技术套管内，静止一段时间后，漏失可达到平衡。此项措施的运用范围包括：

(1) 钻进过程中因操作不当，人为憋裂地层而发生诱导裂缝进而引起的井漏。

(2) 钻井液密度过高，液柱压力超过地层破裂压力而产生的井漏。

(3) 深井井段发生的井漏。

(4) 钻进过程中突然发生的井漏。

(5) 无论什么原因发生的井漏，在组织堵漏实施准备阶段均可采用静止堵漏。

静止堵漏的施工要点如下：

(1) 发生井漏时应立即停止钻进和钻井液循环，将钻具起至安全井段，静止一段时间（一般 8 ~ 24 h）。

(2) 如果起至技术套管内静止，静止时间内可不灌钻井液。但如果在裸眼井中静止，则应定时灌入钻井液，保持液面在套管内，以防止裸眼井段地层坍塌。

(3) 在发生部分漏失的情况下，如果循环堵漏无效，最好在起钻前先替入堵漏液覆盖漏失井段，然后起钻，以增强静止堵漏效果。

(4) 再次下钻时，应控制下钻速度，尽量避开在漏失井段开泵循环。如必须在此井段开泵循环，应先采用低泵压、小排量开泵循环观察。若不发生漏失即可恢复钻进，然后再逐渐提高排量。

(5) 恢复钻进后，钻进液密度、黏度和切力不宜立即作大幅度调整。若需调整，也要逐步进行，并注意控制加重速度，防止再次发生漏失。

3) 暂堵法

暂堵法是指应用暂堵材料对目的层进行封堵，成井后期采用

相应的解堵剂进行解堵的一种堵漏方法。

其他堵漏方法具体可参考有关资料。

第四节 直井防斜技术^[7]

对于直井而言,设计轨道都是一条铅垂线,不需要进行特殊的设计。但实践证明,直井的轨迹控制难度很大,甚至比定向井轨迹控制难度还大。直井的轨迹控制,就是要防止实钻轨迹偏离设计的铅垂线。一般来说,实钻轨迹总是要偏离设计轨道的,所以实钻的直井总是会发生井斜的。要想控制直井井眼绝对不斜是不可能的,问题在于能否控制井斜的度数或井眼的曲率在一定范围之内。

一、井斜原因

影响井斜的因素很多,但概括起来可分为两大类:一类是地质因素;另一类是钻具因素。

(一)地质因素

(1)地层可钻性的各向异性,即地层可钻性在不同方向上的不均匀性。

(2)地层可钻性的纵向变化(软硬交替)。

(3)地层可钻性的横向变化。

从以上分析可知,地层可钻性的各种不均匀性和地层倾斜引起井斜的原因,最终体现在钻头对井底的不对称切削,使钻头轴线相对于井眼轴线发生倾斜,从而使新钻的井眼偏离原井眼。

(二)钻具因素

钻具导致井斜的主要因素是钻具的倾斜和弯曲。影响最大的是靠近钻头的那部分钻具,称作“底部钻具组合”(Bottom

Hole Assembly, 简称 BHA)。钻具的倾斜和弯曲将产生两个后果：一是引起钻头倾斜，在井底形成不对称切削，使新钻的井眼将不断地偏离原井眼方向；二是使钻头受到侧向力的作用，迫使钻头进行侧向切削，这样也使新钻的井眼将不断地偏离原井眼方向。

导致钻具倾斜与弯曲的原因有以下几种：

(1) 由于钻具直径小于井眼直径，钻具和井眼之间有一定的间隙，所以钻具在井眼内活动余地很大，这就给钻具的倾斜和弯曲创造了空间条件。

(2) 由于钻压的作用，下部钻具受压后必将靠向井壁一侧而斜。当压力超过一定值后，钻柱将发生弯曲。弯曲钻柱将使靠近钻头的钻具倾斜更大。

(3) 还有一些原因也会导致钻具倾斜和弯曲，如：下入井内的钻具本身就是弯曲的；在安装设备时，天车、游车和转盘三点不在一条铅垂线上；转盘安装不平而引起钻具一开始就倾斜等。

除上述地质和钻具原因外，井径扩大也是井斜的重要原因。井径扩大后，钻头可在井眼内左右移动，靠向一侧，也可使受压弯曲的钻柱挠度加大，于是钻头轴线与井眼轴线不重合，导致井斜。

上述三方面的原因中，地层条件是客观存在的，无法改变，钻具原因可以人为控制。

二、防斜钻具

(一) 满眼钻具组合控制井斜

由上可知，井斜的原因可归结为：①钻头对井底的不对称切削；②钻头轴线相对于井眼轴线发生倾斜；③钻头上侧向力导致对井底的侧向切削。为了克服这三个原因，满眼钻具组合就是这

样设计的。但是这样做将无法使钻井液循环，在施工中是行不通的。实际上是采用扶正器组合的办法来解决。

所谓满眼钻具组合是在靠近钻头大约 20 m 长的钻铤上适当安置扶正器，以此来达到防斜之目的。所谓“适当安置”，包括扶正器的数量、位置和直径。这里推荐我国著名石油钻井专家杨晓尧提出的满眼钻具组合，简称 YXY 组合。YXY 组合一般包括 4 个扶正器，自下而上分别为近钻头扶正器（与钻头直径仅差 1~2 mm）、中扶正器（位置经过严格计算）、上扶正器、第四扶正器。其具体组合中，扶正器之间的距离设置和具体使用等可参考有关资料。常用稳斜钻具组合见图 3-24。

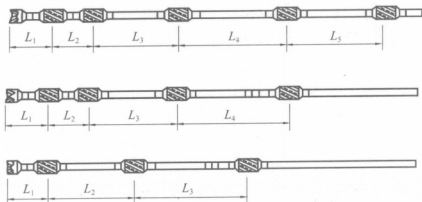


图 3-24 稳斜钻具组合

(二)钟摆钻具组合控制井斜

当钟摆摆过一定角度时，在钟摆上会产生一个向回摆的力，称做钟摆力。显然，钟摆摆过的角度越大，钟摆力就越大。如果在钻柱的下部适当位置加一个扶正器，该扶正器支撑在井壁上，使下部钻柱悬空，则该扶正器以下的钻柱就像一个钟摆，也要产生一个钟摆力。此钟摆力的作用是使钻头切削井壁的下侧，从而使新钻的井眼不断降斜。钟摆钻具组合设计及使用可参考有关资

料。常用降斜钻具组合见图 3-25。

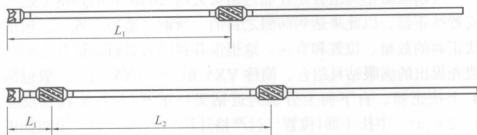


图 3-25 降斜钻具组合

第四章 成井工艺

地热井施工中，钻井是基础，成井是关键，二者统一于施工的全过程。钻井到底并不意味着地热井的完成；成井工艺的优劣决定地热井质量的好坏。因此，对于地热井施工，后期的成井显得十分重要。

千米地热井成井不同于一般的水井，它要求水温、水量二者的共同兼顾，成井的每一环节要求都很严格，加之井深大，井管重量大，工艺环节多，稍有不慎，就可能前功尽弃或功亏一篑。

第一节 成井工艺选择

一、成井工艺流程选择^[8]

地热井是在长期温度较高的条件下工作，不同于普通水井，必须严格成井工艺，确保成井质量，使地热井达到优质、高产、长寿。

成井工艺流程选择，要根据不同的地层、井深、钻孔结构、井管结构、钻机提升力及综合技术处理水平等，它不是单一的工艺环节，也不是固定的模式，它与施工者综合技术素质及设备配置能力有关。

根据中原地区千米地热井施工配置及综合技术水平，基本成井工艺流程如下：钻井结束→第一次冲孔换浆→物探测井→通井→扫刮泥皮→第二次冲孔换浆→一次下管→第三次冲孔换浆→填砾（第一次止水）→固井（止水）→洗井→抽水试验（分析、化验、整理

资料)→验收交井。

二、地球物理测井

(一)地球物理测井

地球物理测井简称测井，是在钻孔中放置测量电、声、放射性等物理性质的仪器，以辨别地下岩石和流体性质的方法，它是勘探和开发油气田、地热等的重要手段。

1. 电阻率测井

电阻率测井是在钻孔中采用布置在不同部位的供电电极和测量电极来测定岩石(包括其中的流体)电阻率的方法。通常所用的电阻率测井系列是深侧向、浅侧向和微侧向电阻率测井。

2. 声速测井

声速测井是利用不同的岩石和流体对声波传播速度不同的特征进行的一种测井方法。通过在井中放置发射探头和接收探头，记录声波从发射探头经地层传播到接收探头的时间差，因而声速测井也叫时差测井。用时差测井曲线可以求出储集层的孔隙度，相应地辨别岩性，特别是易于识别含气的储集层。

3. 放射性测井

放射性测井即是在钻孔中测量放射性的方法，一般有两类：中子测井与自然伽马测井。中子测井是用中子源向地层中发射连续的快中子流，这些中子与地层中的原子核碰撞而损失一部分能量，用探测器(计数器)测定这些能量，用以计算地层的孔隙度并辨别其中流体性质。自然伽马测井是测量地层和流体中不稳定元素的自然放射性发出的伽马射线，用以判断岩石性质，特别是泥质和黏土岩。

4. 井温测井

井温测井又称热测井，它可以进行地温梯度测量，可以在产液井中寻找产液的井段，在注入井中寻找注入的井段热力采油井，

可以通过邻井的井温测量检查注蒸气的效果，可以评价压裂酸化的效果等。

5. 地层倾角测井

地层倾角测井是在钻孔中测量地层倾斜方向和倾斜角度的方法。根据测得的数据，可以研究地质构造与沉积环境，从而追踪地下资源的分布情况。

6. 井径测井

井径测井仪是用来测量钻孔直径的。在未下套管的井中可以测量井径的不规则程度，提供下套管固井施工所需要的水泥用量参数；还可根据钻孔的不规则形态，分析判断地下岩层裂缝的发育程度和裂缝的方向。在套管受损坏的井中，可以测量套管损坏的位置和变形情况。

7. 自然伽马射能谱测井

自然伽马射能谱测井是测量地层中放射性元素铀、钍、钾 40 和伽马射线强度谱，从而确定它们在地层中的含量，用于分析岩石和流体性质。

8. 声波变密度测井

补偿声波测量的是接收到的声波波列的首波达到的时间，用于测定地层的声波传播速度，源距较短，其资料用来计算地层孔隙度和确定气层。全波列声波测井记录的是接收到的声波全部波列，可测定岩层的全部弹性模量，其源距较长，用于求解岩层强度，检查压裂效果及固井重量等，在求解地层孔隙度及判断气层方面比补偿声波更为准确。

9. 测井相

测井相又名电相，是从测井资料中提取与岩相有关的地质信息，并将测井曲线划分若干个不同特点的步单元，经与岩心资料详细对比，明确各单元所反映的岩相，即是测井相。在一个地区建立了测井相后，可以利用测井曲线解释出井的柱状岩性剖面图。

(二)物探测井

钻井结束后,进行冲孔换浆工作,降低钻井液密度和含砂量,并准确校正井深,确保测井仪器顺利下井,一般情况下,二者测量井深误差不超过 1 m。

随着科学技术的发展,物探测井在钻井过程中已普遍采用,而且由过去的模拟测井向数字化测井发展。现代钻井施工,后期的成井大多依赖于物探测井数据的解释,这种方法已被人们所接受(见图 4-1)。具体的原理可参考有关资料。

中原地区千米地热井施工,成井前的物探测井,主要采用 JDC-2 型水文物探测井仪进行,分别测出自然电位、视电阻率、梯度、井温、井径、井斜等与成井有关的曲线(数字),为合理分析井眼质量及取水段含水层参数等提供了必需的资料。

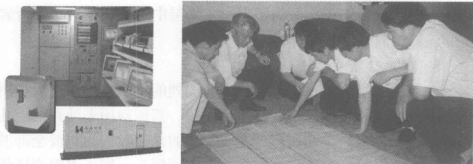


图 4-1 测井及解释

三、取水段选择

取水层(段)的选择是地热井能否满足水温水量等的重要技术工作。地热井施工的目的也在于选取该目的层,以满足施工设计的要求。

物探测井资料完成后,要经过技术人员认真分析,结合区域

水文地质情况,同时,还要结合地质条件(钻时捞样、岩心录井、钻井液录井、钻时速度)等,对含水层、地热增温情况以及井身质量作出解释,预测该井水温、水量,并划定取水层位及确定过滤器的安放位置等。

第二节 通孔与破壁^[9]

一、通孔(井)

通孔也称留孔,目的在于检查钻孔是否存在急剧弯曲、缩径、探头石等不利于下管的部位。通孔方法是用长 10 m 左右的直径比井眼小 10~15 mm 的岩心管,从上到下进行通孔工作,判定整个井身是否顺直而圆整。

通孔过程中要适当开泵,上下提拉钻具,遇阻时要求扫孔,至顺利为止。扫孔过程中要注意调整钻井液参数,逐渐把密度、黏度降下来。由于岩心管较长,容易黏附卡钻,因此要求通孔时岩心管不得在某一孔段停留时间过长。

对于复杂地层或基岩深井,可用钻柱带钻头通孔。

二、破壁

水井施工存在一对矛盾,即钻井过程中应护好壁而成井过程要破好壁,以消除钻井液及泥饼对含水层水力通道的损害(堵塞)。尤其地热井施工中,井深大,井温高,钻井液性能的控制显得更为重要。当进入含水目的层后,要降低钻井液密度及失水量,最好选用暂堵钻井流。根据施工地热井的实践,破壁时至少采用两种以上的方法,这样,对于打开含水层水力通道是有利的。

为了破坏钻井液对含水层的影响,一般情况下,采用以下方法进行处理。

(一)破壁器

用小于井眼 100 ~ 150 mm 直径的岩心管作外管，其上螺旋状打眼(每米 20 ~ 30 个)，内管用钻杆组成，外管长 6 ~ 8 m，内管底部长出外管 150 ~ 200 mm；在外管所打孔眼内穿上 $\phi 18 \sim 22$ mm 的钢丝绳，使外管连同钢丝绳外径比井眼直径大 20 ~ 40 mm，即可扎好绑牢。上部用接头与钻杆相连接，下入目的层扫孔，同时把钻井液送入井内循环；从上到下，从下到上，反复扫壁，使含水层段的泥皮破坏。另外，破壁的同时，调整钻井液性能，降低对含水层的损害程度。

对于每一层含水层破壁时，要使含水层砂粒剥落，形成新的自由面后才能停止。

(二)破壁枪

破壁枪的使用也在于破坏含水层表面的泥饼，减少钻井液对目的层的损害。

它的具体制作方法为：采用比井眼直径小 100 mm 左右的无缝钢管 1.5 ~ 2.0 m，在其上沿螺旋方向布孔，孔眼大小、数量根据现场泥浆泵的压力及排量来选择。尽量使破壁枪流速高、压降大，形成的水力功率大。

具体使用：用钻杆连接下入含水层，打开泥浆泵使破壁枪冲刷目的层，达到破壁目的。

为了保证破壁效果，工作结束后，最好在含水层段压入一定量的清水或焦磷酸钠溶液。

第三节 井管安装

地热井施工中，由于钻井深度大，钻遇地层复杂，钻井投资大，成井后水温较高，地下水中矿物质含量较一般水高，要求使用寿命长等，因此井管的选择与安装特别重要，对于井管的选择

不但要考虑井管重量，更要考虑井管受力及其本身质量等。

一、井管受力与质量选择

(一)井管受力分析

井管下入井中之后要受到多种力的作用。一般情况下，井管所受的基本载荷可分为拉力、外挤压力及内压力。井管的受力分析是千米地热井成井设计的基础工作。

1. 井管的轴向拉力

井管的轴向拉力是由本身的自重产生的，但在某些条件下还应考虑附加的拉力。

实际上井管下入井内是处在钻井液的环境中，井管要受到钻井液的浮力。但在石油钻井套管设计时，我国现场工作者一般不考虑钻井液的浮力减轻作用，通常是用套管在空气中的重力来考虑轴向拉力，认为浮力被井管与井壁的摩擦力所抵消，但在考虑井管双向应力下的抗挤压强度时用浮力减轻所下的井管重力。对于较深的地热井我们可以借鉴此方法。

另外井管所受的力还有：

(1) 井管弯曲引起的附加应力。主要是当井管随井眼弯曲时，由于井管的弯曲变形增大了套管的拉力载荷。

(2) 井管内注入水泥引起的井管附加应力。在注入水泥浆时，当水泥浆量较大，水泥浆与管外液体密度相差较大，水泥浆未返出井管底部时，管内液体较重，将使井管产生一个拉应力。可用下式计算

$$F = h d^2 \pi (\rho_1 - \rho_2) / (4 \times 10^3) \quad (4-1)$$

式中 F ——注水泥产生的附加力，kN；

ρ_1 ——水泥浆密度，g/cm³；

ρ_2 ——钻井液密度，g/cm³；

h ——管内水泥浆高度，m；

d ——井管内径, cm。

(3)其他附加力。在下管过程中的动载,如上提井管或刹车时的附加拉力,注水泥时泵压的变化等皆可产生一定的附加应力。这些力是难以计算的,通常是考虑用浮力减轻来抵消或加大安全系数。另外,井中温度的变化也可引起附加应力的变化。

2. 外挤压力

井管所受的外挤压力,主要来自管外液柱的压力、地层中流体的压力、高塑性岩石的侧向挤压力等。

一般情况下,外挤压力按最危险的情况考虑,即按套管内全部无液体时,受液柱的压力,其最大外挤压力为

$$F=9.81\rho\cdot H \quad (4-2)$$

式中 F ——井管外挤压力, kPa;

H ——计算点深度, m;

ρ ——管外液体密度, g/cm^3 。

由上可知:井管底部所受的外挤力最大,井口处最小。

3. 内压力

井管所受内压力的来源有地层流体进入井管产生的压力及酸化、注水、压裂时的外来力。

(二)井管质量选择

井管质量选择主要考虑井管的抗拉力、抗挤力以及由于温度变化及水中矿物质含量的变化及对井管的腐蚀等。因此,选择井管时需考虑以下原则:

(1)满足下管时的抗拉、压、挤要求。

(2)对地下水不产生污染。

(3)具有抗老化、抗腐蚀的作用。

(4)使用寿命较长。

根据以上原则及实践,按以下方法选用井管:

(1)当井深小于 1 000 m,水温小于 45℃,且矿化度小于

1 000 mg / L 时, 可选用一般钢管(无缝钢管、直缝钢管、螺旋管等)。

(2) 当井深小于 1 000 m, 水温小于 45 ℃, 且矿化度大于 1 000 mg / L 时, 建议选用螺旋管或 API 管。

(3) 当井深大于 1 000 m, 水温大于 45 ℃, 且矿化度小于 1 000 mg / L 时, 建议选用直缝钢管、螺旋管等。

(4) 当井深大于 1 500 m 时, 不论水温高低、矿化度大小, 建议使用 API 套管。

(5) 当井深大于 1 500 m, 地热水中含有气体或液体的硫化氢(H_2S)、溶解氧、二氧化碳时, 建议使用 API 套管中的 H 级、K 级、J 级、C 级、L 级。

(6) 对于其他类型的腐蚀, 可采取阴极铜板保护、防腐剂等措施。

(7) 选用非 API 标准管时, 要符合国际要求。

二、井管结构及下入方法

(一)井管结构

地热井施工, 对于井管的结构选择, 一般力求安全、简单、实用。

(1) 对于开采比较稳定的基岩水的地热井, 一般井管结构(从下自上)为沉砂孔段—取水层段(裸眼)—导水管—泵室。

(2) 对于全部下入井管的地热井, 一般结构(从下自上)为沉砂管—技术管—过滤器—导水管—泵室。

泵室的选择根据当地地热井水头及动水位变化情况决定, 一般情况不小于 200 m。沉砂管上部的技术管是专门用来座封隔器的。

(二)井管重量计算

1. 井管在空气中的重量

$$F = \sum qL \times 10^{-3} \quad (4-3)$$

式中 F ——井管在空气中的重量, kN;
 q ——井管单位长度的名义重力, N/m;
 L ——井管长度, m。

用以上公式计算时, 不同直径的井管及长度分别计算, 最后累计; 对于过滤器的重量, 按实管计算, 不考虑其减重部分。

2. 井管在钻井液中的重量

$$\begin{aligned} F_m &= \sum qL(1 - \rho_2 / \rho_1) \times 10^{-3} \\ &= \sum K_B qL \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (4-4)$$

式中 F_m ——钻井液中的重量, kN;
 ρ_1 ——井管钢材密度, g/cm³;
 ρ_2 ——钻井液密度, g/cm³;
 K_B ——浮力系数, $K_B = 1 - \rho_2 / \rho_1$ 。

(三)下管方法^[1]

下管方法一般分为一次下管和二次下管。在地热井施工中一般不提倡使用二次下管, 因为井下对接存在质量隐患, 长时间使用对接处容易进入冷水等, 使水温水质发生变化。

1. 一次下管法

一次下管中, 又分为机械一次下入法和浮力一次下入法。对于每一眼地热井最终使用什么下管方法, 主要应考虑以下几方面:

(1) 当井管抗拉强度小于井管本身重量时, 不能采用机械一次下入法。

(2) 当井管抗拉强度大于井管本身重量时, 能否采用机械一次下管法, 要考虑钻机的提升能力。

(3) 当钻机的提升能力大于井管重量且井管的抗拉强度大于自身重量时, 可考虑机械一次下入法。

(4) 当钻机提升力小于井管重量时, 必须考虑浮力下管法。

(5) 不论采取何种方法都要考虑井管在井内所受的各种压力。

2. 浮力下管法

当井管抗拉力不能满足机械一次下管要求或钻机提升力不能满足下管最大重量时,要采用浮力一次下管法。有时为了减轻钻机负荷,保证井内安全,也采用浮力一次下管法。利用此方法可以下入比钻机提升力大得多或超过井管极限下入深度的井管。

浮力下管法是指利用抗压强度较大的一定厚度的材料安放于井管一定的位置,使其上部产生的浮力大于或等于上部井管的重量,从而使井管安全下入井内的方法。

(1) 浮板产生的浮力(减轻重量):

$$F = \pi d^2 L \rho / (4 \times 10^{-3}) \quad (4-5)$$

式中 F ——浮力,即减轻的井管重量, kN;

d ——封闭段井管外径, cm;

L ——封闭段沉入钻井液长度, m;

ρ ——钻井液密度, g/cm³。

(2) 浮板承受的压力:

$$P = L \rho \quad (4-6)$$

式中 P ——浮板单位面积承受的压力, kN/m²;

L ——浮板沉入钻井液的长度, m;

ρ ——钻井液密度, kN/m³。

(3) 浮板厚度计算:

$$T = (3PR / 4S)^{1/2} \quad (4-7)$$

$$S = S_0 / n \quad (4-8)$$

式中 T ——浮板厚度, m;

P ——浮板单位面积所受的压力, kN/m²;

R ——浮板的有效半径, m;

S ——浮板安全弯曲应力, kN/m²;

S_0 ——浮板材料的极限弯曲应力, MPa;

n ——安全系数，一般 $n=5$ 。

浮板的有效半径可按井管的内圆半径计算，浮板的安装应尽量放在小径井管处，以减小浮板厚度，也便于浮板的处理。

利用浮板下管应注意以下事项：

(1) 浮板安装必须坚固，下管过程中不准向管内观看。

(2) 井管下入时必须缓慢，避免猛冲而破坏浮板。

(3) 井管到位后，在井口固定好井管，扫浮板前向井内加满清水或钻井液。

三、井管的连接

地热井施工，由于深度大，井管的连接一般采用两种方法，即井口对焊法和丝扣对接法。

(1) 井口对焊法一般用于井深小于 1 500 m 的地热井，采用非 API 标准管材。下管前，先下入的井管头部焊有接箍，接箍与井管焊接后，接箍上还加有 3~4 个焊孔，在井口对接时，上部的井管插入下部井管接箍内，找正位置进行焊接，除圆周焊接外，同样有 3~4 个焊孔需焊接，这样一根一根地接下去。

(2) 丝扣对接法一般用于井深大于 1 500 m 的地热井，采用正规的 API 系列管材用丝扣对接下入井内。

(3) 扶正器(见图 4-2)的装入。为了防止井管轴线偏离井眼中心，一般每隔 20~30 m 安装扶正器一组。



图 4-2 扶正器

(4) 不论采用哪种连接方式(见图 4-3), 井管入井前及入井过程中, 必须有可靠的挟持器械, 以确保井管顺利安全入井。

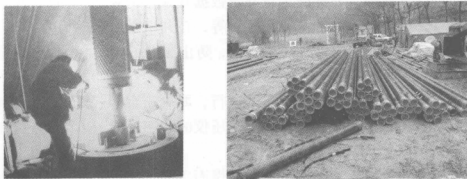


图 4-3 井管连接方式

四、下管注意事项

井管的安装在成井工作中是非常重要的环节, 它直接影响成井的质量。在井管安装过程中, 稍有不慎, 很容易发生井管和滤水管错位、断裂、扭斜或中途阻塞等事故。尤其对于上千米的地热井, 一旦发生井管事故, 处理起来非常困难, 大多数情况下可能导致整个地热井报废。因此, 后期的成井下管必须采取谨小慎微的做法, 做好各方面准备。

(一) 下管准备

- (1) 下管前, 要做最后一次探孔, 检查孔内井筒质量情况。
- (2) 做最后一次孔深校正, 误差不大于 1%。
- (3) 下管前, 孔内钻井液各参数满足要求。
- (4) 所有用于下管的器具、材料等准确到位。
- (5) 对于用于下管的设备、仪表等进行一次全面检查, 确保万无一失。

- (6) 下管前, 由技术人员召开全体员工会议, 强调工作过程、

注意事项和明确分工。

(二)注意事项

- (1)下管中,要准确丈量井管数据并编号记录。
- (2)对下入井内的井管、滤管等,在井口做最后的检查。
- (3)井管对接要达到质量要求,防止漏焊、砂眼、上扣不到位等。
- (4)扶正器的安装要按设计进行,要周正牢固。
- (5)下管过程中要密切注意钻压仪的数字变化,以严密监控井管悬重、中途遇阻情况等。
- (6)井管的下放和提升速度缓慢而平稳,其中途遇阻时,应查找原因,采取相应措施,不得将井管强行向下冲击,必要时起拨井管,处理后重新下入。
- (7)要有专人检查井管在井口的焊接、上扣等情况。
- (8)下管至最后时,密切注意刹车系统的可靠性,刹车操作台前要有两人负责。交班时,当班和交班班长应共同操作升降机半小时以上,待两人感觉一致时方可交班。
- (9)井管送入井底后,应保持足够的拉力,使井管上下垂直受力均匀,中性点位于滤水管上部的实管上,尤其是止水段以下井管要处于自重状态。
- (10)采用浮板下管时,浮板的破除要严格按照操作规程处理。

第四节 冲孔换浆

一、换浆目的

第三次冲孔换浆是下管后填砾(固井、止水)前的最后一次。三次冲孔换浆分布于三个不同时段,以达到相应的技术目的。

第一次冲孔换浆应用于测井前,用优质泥浆替换出井内钻屑,

以保证测井探头顺利下至井底，完成测井任务。

第二次冲孔换浆应用于下入井管前，破壁后，用低密度、中度、低失水量的泥浆冲孔，清除井内沉淀，以保证井壁安全，初步使含水层打开，以便顺利下入井管。

第三次冲孔换浆应用于下入井管后，目的在于打开含水通道，获取满意的水温、水量等技术指标。此项工作要在钻探工程师、水文工程师和泥浆管理员的共同监督下进行。

二、换浆方法

将 $\phi 73$ 油管及支撑式封隔器送入井管内，使封隔器座封在沉砂管上部的技术管内，施加一定量的压力，使封隔器封闭技术管，在井口装上密封器，从而使冲洗液进入通道与返出通道在“密闭”系统循环。防止了冲洗液在井管内流动循环的现象，确保冲洗液在井管与井壁间循环。这样的循环对于取水层具有较大的冲刷作用，确保含水通道在填砾(止水)前打通。具体换浆通道见图 4-4。



图 4-4 换浆通道示意图

为了更好地控制换浆质量，提供以下公式。

(1)降低泥浆比重时加水量的计算：

$$q = V \cdot (\gamma_1 - \gamma_2) / (\gamma_2 - \gamma_0) \quad (4-9)$$

式中 q ——所需水量， m^3 ；

V ——原泥浆体积, m^3 ;

γ_1 ——原泥浆密度, g/cm^3 ;

γ_2 ——稀释后泥浆密度, g/cm^3 ;

γ_0 ——水的密度, g/cm^3 。

(2) 泥浆循环周时间计算:

$$T = (V_1 - V_2) / (60Q) \quad (4-10)$$

式中 T ——泥浆循环一周的时间, min ;

V_1 ——井眼容积, L ;

V_2 ——井内管柱(井管及钻柱)体积, L ;

Q ——泥浆泵排量, L/s 。

(3) 泥浆上返速度计算:

$$v = 12.7Q / (D^2 - d^2) \quad (4-11)$$

式中 v ——泥浆上返速度, m/s ;

Q ——泥浆泵排量, L/s ;

D ——井径, cm ;

d ——井管外径, cm 。

封隔器、单项阀及井口密封器三者的联合使用对于地热井后期成井质量起到了关键性的保证作用。

封隔器(见图 4-5)有两种型号:一种为卡瓦式;另一种为支撑式。在地热井后期成井中采用封隔器的主要目的在于,代替过去水井施工中在管底使用冲孔托盘或反丝接头的做法来冲孔换浆。大家知道,不论是冲孔托盘还是反丝接头,随着井深的加大,在后期的冲孔过程中并不能完全保证所有进入钻杆内的泥浆全部从沉砂管返出,有相当多的一部分泥浆是从托盘或反丝接头处漏出,在井管内上升,从管内返出,走了“近路”,从而不能有效地冲刷含水层的井壁等。而封隔器可以彻底做到这一点,把它设计在沉砂管上并施加一定的压力,胶筒胀大封死井管内壁,使泥浆通过封隔器后只能向沉砂管一个方向的通道流出,这样确保所有冲

洗液从沉淀管返出，提高冲刷井壁的质量。

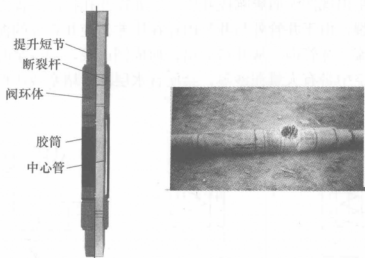


图 4-5 封隔器

井口密封器主要用来防止冲洗换浆过程中泥浆串入井管内从井口返出或从上部环空返出。当在井口安装了密封器后，从上到下，可以把整个井管内的流体看做是一个“封闭”液柱，当冲洗泥浆从沉砂管上返时，可以确保冲洗液全部从环空上返；如果井口不加密封装置，有些情况下，冲洗液从沉砂管返出后从下部环空通过滤水管进入井管内，从井口返出或绕流后又从某处的滤水管流入环空等，这样不利于对目的层的冲刷，也不利于取水层的打开。

井口密封器的设计是用橡胶制成的，其外径稍小于井管内径，中间设有穿入某一尺寸钻杆的圆孔，橡胶板上下有钢板通过螺杆相连。当把橡胶板置于井口井管内时，把穿于橡胶板上的螺杆用螺栓压缩，从而使橡胶板纵向压缩产生横向变形，挤密井管及钻杆，起到密封井口作用。

单向阀(见图 4-6)设计的目的是防止在冲孔换浆及后期

填入砾料时,由于泵压升高或地面管线、阀门出现问题,从而使井内泥浆出现倒流而影响成井质量。如在冲孔投砾过程中高压管突然破裂,由于井管外与井管内存在压差,使井管外的泥浆通过滤水管流入井管内,从井口流出,形成倒返浆。倒返浆时,由于井外环空中带有大量泥沙等,会使含水层滤管堵塞或压偏滤水管等,影响成井质量。

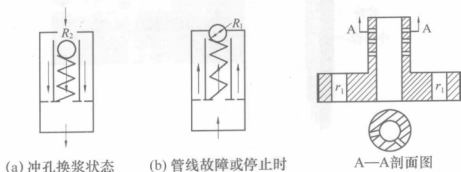


图 4-6 单向阀

单向阀是一个球形阀,把它安装在冲孔钻具上,同井底封隔器、井口密封器共同作用,确保了冲孔换浆等整个过程的安全和质量。

第五节 过滤器选择

过滤器亦称滤水管,主要安装在不稳定的、但要求出水的含水层段,它是让水进入井内将砂挡在管外的滤管。过滤器构成了开采水井的工作端部,从地层流来的水经过它进入井筒,在很大程度上影响着井的寿命和出水效率。在选择过滤器时,要考虑四个基本因素:①一个好的过滤器应有足够的强度以支撑井孔;②应具防腐蚀性;③应防止砂粒过多地进入井中;④应使水进入时的摩阻力最小。

一、过滤器型号选择

千米地热井施工，由于井深较大，终孔直径一般不大于 450 mm，加之深井施工井径的增大并不能带来水量的显著提高，因此选用过滤器要结合不同区域地层的特性及终孔时的口径等。

在地热井施工中，一般选用如下几种型号的过滤器。

(一)缠丝打眼过滤器

骨架管选用地质管材、API 系列管材，直径一般在 $\phi 89 \sim 159$ mm 范围内，打眼直径一般为 $\phi 18 \sim 20$ mm，孔隙率不大于 30%，不小于 20%，既要考虑一定的强度，又要考虑耐蚀性。

缠丝尽可能选用高强度、耐腐蚀的钢丝或喷塑而成。

针对不同的地区特性考虑缠丝间距。一般掌握在 1.5 mm 左右。

(二)桥式过滤器

桥式过滤器(见图 4-7)是 20 世纪 80 年代初期从国外引进的产品。它的主要制作原理为：在钢板上冲压出具有小桥一样的凸起，凸起两侧形成缝隙，很多小桥冲成后，用卷管机制成圆管。一般内外要镀锌，以防腐蝕。孔隙率的大小一靠“桥”的数量，二靠“桥”的高度。现已形成系列产品，桥高一般在 1.0 ~ 1.5 mm，最小直径为 $\phi 89$ mm，最大可达 1 m 以上。一般厚度在 4 ~ 6 mm。现在也生产出了 8 mm 厚的桥式滤水管。



图 4-7 桥式过滤器

桥式滤水管的推广应用，使缠丝打眼滤水管有逐渐被淘汰的趋势。因为，桥式滤水管加工简单，批量生产成本低，更因为它的水力特性受到人们的普遍欢迎。它的阻砂性能特别明显，因为它在井内的进水角度明显优于缠丝管。对于缠丝管而言，

水流是以垂直过滤器方向进入滤管；而桥式管，因为它的缝隙不直接面对来水，它以 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 角进水，阻挡了水流的直接冲击。

中原地区千米地热井施工中现已普遍采用桥式过滤器，一般选用型号为 $\phi 159$ mm，桥高 1.0 ~ 1.5 mm，壁厚 6 ~ 8 mm。

(三) 笼状过滤器

笼状过滤器(见图 4-8)是缠丝打眼过滤器与桥式过滤器的组合。千米地热井施工初期，受技术工艺和思想观念的影响，施工地热井终孔口径一般在 450 mm，而又害怕砾料投不到位。因此，人们加工生产了笼状过滤器。在缠丝管与桥管之间充填了砾料，成井时，下入目的层井段。一般采用型号为：外管采用 $\phi 377$ mm \times 6 mm 桥管，内管采用 $\phi 159$ mm \times 6 mm 钢管打眼缠丝。由于笼状滤水管加工成本高，搬运不方便，随着地热钻井技术及对地层特性认识的不断提高，使终孔口径逐渐缩小，现已基本淘汰笼状过滤器。



图 4-8 笼状过滤器

(四) 贴砾滤水管

20 世纪 70 年代始，原地矿部就大力推广使用贴砾滤水管(见图 4-9)，但由于产品的力学性能指标和生产工艺等原因，致使这项技术一直未能大力推广应用。

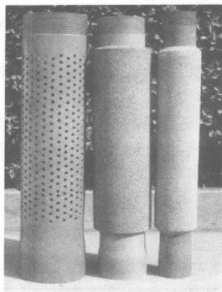


图 4-9 贴砾滤水管

针对原贴砾滤水管存在的问题和不足,我们从 1995 年开始与吉林大学合作研制出了一种新型高强度贴砾滤水管(见图 4-10)。并在实际生产应用中取得了较好的效果。



图 4-10 高强度贴砾滤水管

1. 新型高强度贴砾滤水管^[10]

该产品制造工艺无须像国内其他厂家装模后放入烤箱(26 kW), 在 175 ℃ 工作温度下烘烤 6 h 才脱模的工艺。

制造工艺是: 衬管打眼→去除油污→量取原料并搅拌→装模(20~120 min)→脱模(放置 3 天)→出厂使用。

2001 年我们又开发了桥式管贴砾这一实用技术, 从而使生产成本进一步降低, 生产技术向前迈进了一步, 也使高强度贴砾滤水管的滤水阻砂性能有了更大的改善。

2. 新旧贴砾滤水管力学指标比较

不同工艺贴砾滤水管比较见表 4-1。

表 4-1 不同工艺贴砾滤水管比较

类别	固化温度 T (℃)	抗压强度 P (MPa)	抗弯强度 M 错误! 链接无效。 (MPa)	抗剪强度 τ (MPa)	脱模时间 t (min)	衬管类型	模具类型
普通工艺	175	7.0	3.0	2.0	>360	钻孔钢管	钢
新型工艺	5~50	18.63	3.73	2.79	10~30	钻孔钢管、桥管	钢或木

注: 新型工艺参数测试由水利部松辽水利委员会基本建设工程质量检测中心检测。

目前, 新型贴砾滤水管已在中原地区千米井地热中得到应用, 产品型号主要有 $\phi 89$ 系列、 $\phi 159$ 系列。建议推广使用。

(五)全焊式 V 形(梯形)绕丝滤水管

全焊式 V 形(梯形)绕丝滤水管是用 V 形绕丝和 V 形筋条(或圆形筋条)在每个交叉点处焊接而成的(见图 4-11)。同现有的多种过滤装置相比, 具有结构坚固、耐高温、抗腐蚀、较高的孔隙率和精确的缝隙尺寸等优点, 且容易反冲洗, 使用寿命长, 安全可靠。产品所用材料是不锈钢(316 L、316、304、304 L、321)、镀锌低碳钢, V 形丝全焊式滤水管孔隙率高达 40%, 由于 V 形丝的

特殊结构，丝管缝隙是外小内大，被过滤物通过时不会发生卡死现象。其产品系列有 38 mm、50 mm、73 mm、108 mm、159 mm、219 mm 等，缝隙在 0.1~1.50 mm 之间调整。建议不填砾时地热深井使用。

(六)组合桥式过滤器

内管作为骨架，其上用等离子调缝 1.0~1.2 mm，外管采用 2~3 mm 钢板，加工成桥式管，桥高 0.75~1.0 mm，之后套在骨架管上，成为组合式过滤器。主要用于不填砾地热井。

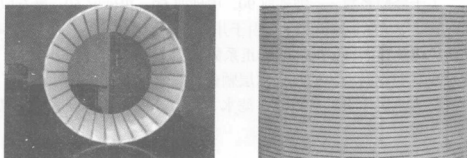


图 4-11 全焊式 V 形(梯形)绕丝滤水管

二、过滤器参数配置

(一)滤水管的长度设计

所有滤水管规格数据中，滤水管的长度与含水层的关系最要紧。滤水管的有效长度是指起滤水作用的实际长度。它随着含水层的厚度、涌水量、滤水管类型和滤水孔的大小、滤水时间等因素变化。

施工实践表明，较长的滤水管在抽水过程中的进水规律是滤水管由上而下其进水量是逐渐减少的。分有最优进水段、一般进水段和不进水段，但在一定条件下，一般进水段可转化为最优进水段，不进水段可转化为进水段，这与地下水特性及开采量有一定的联系。

滤水管长度计算(经验公式)

$$L = Q \alpha k / D \quad (4-12)$$

式中 L ——滤水段的有效长度, m;
 Q ——水井涌水量, t/h(根据周围井测算);
 α ——经验系数, 决定于含水层颗粒组成情况;
 D ——滤水管外径, mm;
 k ——修正系数。

关于经验系数 α , 细砂取 90, 中砂取 60, 粗砂取 50, 砾石取 30。但对于千米地热井施工, 由于井深大, 承压含水层相对孔隙率较低, 因此在取 α 值时要用修正系数 k , 一般取 k 值为 2.0~3.0, 含水层颗粒粗时取小值, 含水层颗粒细时取大值。

当含水层中有粉砂段时, 滤水管要错开安装。一般情况下以底板为界。

(二)滤水间隙和孔隙率

1. 滤水间隙的确定

滤水管的挡砂作用主要由滤水孔或连续孔的间隙的大小来决定。滤水孔的尺寸取决于含水层砂粒的有效粒度。

(1) 当滤水管外填砾时, 滤水间隙的大小应当保留住 90% 以上的填料。

(2) 当滤水管外不填砾而直接接触天然层时, 滤水间隙应根据取水层的砂样分析资料确定。

凡是下入滤水管的井段, 建议都应对取水层的砂粒(样)进行分析。

2. 孔隙率

不同类型的过滤器孔隙率存在差异, 由于地热井所下入的滤水管深度大, 要求滤水管本身具有足够的强度。因此, 合理控制孔隙率十分重要。一般情况下孔隙率要求大于 15%。

(三)进水速度

由于地热井深度大,水的压力较大,在下入滤水管时,滤水管的孔隙一般较小,加之安装的滤水管长度一般大于 60 m,因此进水流速相对比较安全(计算公式可参见有关资料)。

(四)滤水管直径

一般情况下,钻孔结构决定后,滤水管的直径也就相应定了下来,这一点对于千米以上深井尤为突出。不过用公式计算滤水管直径有助于进一步选择校对滤管。

$$D=Q/(nLmv) \quad (4-13)$$

式中 m ——滤水管孔隙率;

v ——最大允许进水速度, m/s (参见有关资料);

其他符号含义同前。

第六节 填砾^[10]

填砾在水井工业上很早就应用了,美国从 1920 年以后就推广使用填砾成井技术,随着现代石油工业与水井业的发展。填砾不仅运用于水井、地热井,而且广泛用于石油完井。而且石油完井中的压砂固砂技术已相当成熟。在国外水井施工中也采用了“固砂”技术。填砾是在滤水管周围充填砾料,使滤水管与地层之间形成人工滤层,起到进水阻砂作用。

当前,国内水井、地热井(基岩井除外)成井,大部分仍以填砾石为主;实际上,现代水井业在技术上已经跨越了单纯的向滤水管周围填加砾料的阶段,进入到了控砂、固砂阶段。所谓控砂,就是向开采层内压入砾料或液体,形成具有一定空隙的人工滤层;所谓固砂一般指向开采层内注入溶液使松散的砂层固结。两者均起到了滤水阻砂的作用。

一、砾料的选择

在填砾的地热井中砾料的选择包括砾料直径、砾料的均匀度和质量。

(一)直径

正确地选择砾料的直径是填砾成功的基本条件。天然含水层的砂样都是经过筛分来确定它的规格等级的。

我国目前仍沿用以过筛颗粒累计重量占总重量的 50% 的筛孔直径代表该砂样的标准直径，记作 d_{50} 。砾料也以同样方法规定，记作 D_{50} 。因此，按下式确定砾料直径

$$D_{50} = (4 \sim 10) d_{50} \quad (4-14)$$

(二)砾料的均匀度

砾料的均匀度注定涉及到用一种规格的砾料还是用多种规格的砾料，即采用“混合填砾”还是“均匀填砾”。

作者认为，对于细砂粗砂地层，采用均匀填砾为好。对于粉砂、细粉砂地层最好采用混合砾料。砾料均匀度的选择要结合本地含水层特性来决定。

(三)砾料质量

砾料入井前应该是干净的、滚圆的、光滑的，具有一定的级配。它应是天然形成的石英砂，含量要达到 80% 以上。

二、填砾厚度及数量

(一)填砾厚度

从理论分析与生产实际观察，填砾的厚度同阻砂之间没有正比关系。目前有些国家规定填砾厚度为 200 mm，有的建议小于 200 mm，选择 75 ~ 100 mm 之间。

作者认为，对于千米地热井而言，不同地区考虑地层特性选择不同的砾料厚度，总体上讲厚度不大于 100 mm，在不大量出砂

的情况下，填砾层越薄越好(最好不填砾)。

(二)填砾数量

一般情况下，砾料的备用量比计算用量大 15%~20%。考虑到钻井冲孔中井径的扩大及洗井、抽水过程中砾料的下沉密实，实际填砾高度要超过最上部滤水管 10~20 m。

砾料需用量可用下式计算

$$V=0.785(D^2-d^2)LK \quad (4-15)$$

式中 V ——需要砾料数量， m^3 ；

D ——井径， m ；

d ——填砾段井管及滤水管外径， m ；

L ——填砾段长度， m ；

K ——超径系数，一般取 $K=1.2\sim1.5$ 。

三、填砾方法

千米地热井填砾不像浅井一样填砾方法多样，它受到井深的影响和限制，目前填砾方法有以下几种。

(一)动水填砾

前面第三次冲孔换浆时已把整个循环系统介绍了。井底密封、井口密封冲洗液从沉砂管返到环空，从环空返到地面，当冲洗液黏度达 18 s、比重达到 1.05 左右时，把砾料从井口周围均匀填入，一般填入速度为 $3\sim6\text{ m}^3/\text{h}$ 。填砾过程中注意返水量、泵压及冲洗液黏度的变化。当砾料超过最上部滤水管时，压力达到最大值。此法可以顺利填入砾料，但要注意调整冲洗液黏度。

(二)贴砾管技术

把砾料粘贴在滤水管上，即采用贴砾管，随井管下入井内。

(三)导管填砾法

此方法用于上部地层发生坍塌、填砾通道受阻时的补救方

法。

根据井眼与井管尺寸大小，选择能下入环空的钻具，深度超过坍塌部位，冲洗液循环后，从环空钻具上部投填砾料。

四、非填砾技术

对于千米深的热井来讲，成井时的填砾过程总是令人担忧，砾料是否到位，就是砾料到位了也存在砾料的分选，大直径的在环空下降比小直径快，最后形成下大上小的砾料层。如果下部井管(眼)弯曲更容易导致砾料厚薄不均，时常导致地热井出砂。再者，填砾过程工作量繁重。

非填砾技术就是在取水层段，只下入过滤器而不填入砾料。非填砾技术的应用要合理选择井眼直径与井管直径的合理匹配参数，最重要的是下管前必须把取水层段的砂层颗粒度级配掌握清楚，这样就可以根据不同含水层砂粒的直径来选择滤水管间隙。

井眼与井管的环空间隙一般在 20 ~ 40 mm。

过滤器选择一般有桥式过滤器、梯形丝滤管和组合式滤管。

非取水层之间用止水材料隔离，防止黏土颗粒等掉入取水段环空。

扶正器安装要合理，取水段一般 10 m 一组。

第七节 止水与固井

一、止水

对目的层以外的地层进行封闭和隔离，以防止对目的层的干扰和污染，为此目的所进行的工作为止水，地热井止水其主要目的的在于取得永久性的稳定的高产水温和水量。

地热井止水材料一般选用以下几种。

(一)优质黏土止水

黏土具有一定黏结力和抗剪强度，压实后又具有不渗透性，且经济实用、来源较广。

地热井止水，常采用优质黏土止水，黏土制作形状有两种。

1. 黏土球

由人力拌和、人工搓成的黏土球，一般直径在 25 ~ 30 mm 之间，经阴“干”后，从井口投入孔内，靠水头压力进行自密。一般止水厚度在 10 m 左右。

2. 黏土棒

在人工制造黏土球的基础上，研制了机械黏土棒设备(见图 4-12)，它生产效率高，生产的黏土棒密度大，规格整齐，使用方便。黏土棒规格为：直径 25 mm，长度 25 ~ 30 mm，小时生产量可达 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

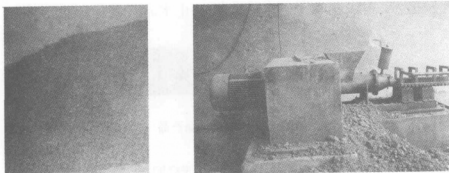


图 4-12 黏土棒和黏土棒机

止水时从井口投入孔内，在水力作用下自粉自密。抗侵时间达 2 ~ 3 h 以上。

黏土止水深度一般不超过 1 200 m。当遇有特殊情况时，用导管法压入井内止水部位。

(二)水泥止水

地热井施工，采用水泥止水时，根据地层特性及地下水温等

选择不同型号的水泥。

1. 普通水泥

地热井不超过 1 500 m，水温不超过 50 ℃时，可采用普通水泥止水。

2. 油井水泥

地热井深度大于 1 500 m，水温超过 50 ℃时，可采用油井水泥止水(固井)。

水泥止水一般采用两种方法：井管内压入和管外压入。

用水泥止水时，止水前要合理选择水泥、水泥外加剂以及用量计算等。

(三)遇水膨胀橡胶止水

遇水膨胀橡胶(见图 4-13)止水，已广泛应用于机械、军工、地下工程箱涵、水库、水坝、公路、桥梁等。国内有多家生产，但经过生产实践在选用遇水膨胀橡胶止水时应考虑以下因素：



遇水膨胀橡胶止水条产品

图 4-13 遇水膨胀橡胶

(1)有优良的弹性、延伸性和膨胀止水性能，在水中的膨胀率达 150%以上，膨胀体保持橡胶的弹性和延伸性，膨胀率不受水质的影响。

(2)耐水性、耐化学介质性、耐久性优良，不含有害物质，无溶胀析出物，不污染环境。

(3)在较宽的温度范围内，均可发挥优良的止水性能，耐候性优良。

(4)可按用户需要制成任意的密封形状。

在地热成井过程中,对于非填砾环空的止水采用遇水膨胀橡胶是确保止水成功的关键环节。非填砾时,防止环空非取水层黏土等掉入取水环空,在取水层顶板、底板处,安装遇水膨胀橡胶,达到止水阻坍塌物的作用。

二、固井

“固井”这一概念,在水井施工中就是采用一定材料把井管与井壁间的环状间隙充填:一是固定井管位置;二是平衡地压。但在石油钻井中,固井包括下套管和注水泥两个生产过程。

通常情况下,水井固井时,有采用泥浆和黏土的,有采用碎石的,等。但随着地热井开发深度的加大,在“固井”这一环节上,建议采用水泥固井为好,因为水泥固井可以确保环空强度,能与井管较好地黏接,对于确保井眼质量和地热井使用都大有好处。

当地热井小于1 500 m且水温小于50℃时,建议采用普通水泥固井;当地热井大于1 500 m且水温大于50℃时,建议采用油井水泥固井。

我国以温度系列为标准的油井水泥有以下四种。

- (1)45℃水泥:用于深度小于1 500 m;
- (2)75℃水泥:用于1 500~3 200 m;
- (3)95℃水泥:用于深度2 500~3 500 m;
- (4)120℃水泥:用于井深3 500~5 000 m。

按API标准,把油井水泥分为九类,即A、B、C、D、E、F、G、H、J级,其中A、B、C级为基质水泥,D、E、F为水泥在烧制时允许加入调节剂,G、H级允许加入石膏,J级应符合其标准。

采用水泥固井,注水泥技术包括的内容选择水泥、设计水泥

性能、选择水泥外加剂、井眼准备、注水泥工艺设计等，具体可参考石油钻井中的固井技术。

第八节 洗井及抽水试验

一、洗井^[1]

所谓洗井是指清除井壁上的泥皮(结垢物)并把钻井时渗入到含水层中的堵塞物抽吸出来，恢复含水层的水力特征所进行的工作。

(一)通过洗井应达到的目的

- (1)消除由于钻井液的渗入而对含水层的堵塞。
- (2)在滤水管周围形成渗透性由高变低的人工滤水层。
- (3)满足设计要求。

(二)千米以上地热井洗井一般选用的方法

1. 气举洗井

采用适合下入井中的钻具，下到一定的位置其上接同心双壁钻杆(或并列式)下入井内，连接空压机(见图 4-14)洗井，它洗井的优点在于可以把钻具下到含水层部位进行洗井。



图 4-14 空压机

另外，采用钻具直接下入井管内一定位置，连接空压机洗井

也可行。

2. 潜水泵洗井

采用潜水泵直接下入井管内,进行大降深抽水,达到洗井的目的。

3. 喷射洗井

利用带有多喷嘴的装置(喷枪),用钻具连接下入取心层段,对准含水层进行冲洗,以达到洗井的目的。有时在成井后为了使管外填砾重新排列也使用该方法。

4. 压水洗井

采用封隔器座封井管内某一位置,井口封闭,用大泵压适当泵量向井周外压水,疏通含水层,达到洗井的目的;压水时,水中可加入某些处理剂。

5. 二氧化碳洗井

利用液态二氧化碳洗井(见图 4-15),是利用常温下气态二氧化碳经高压可以变成液态的性质,把它送入井内,使之由液态再变成气态,体积增大产生高压水流,瞬间冲出井外,在井内对含水层造成一定的负压力,达到洗井的目的。



图 4-15 二氧化碳洗井

6. 酸化洗井

利用一定浓度的盐酸，按操作规程压入井内，使盐酸与井壁及外部有关物质发生化学反应而溶入盐酸溶液中，达到洗井的目的。

采用不同方法洗井时，均要按有关操作规定处理，防止意外事故发生。

总之，千米地热井洗井，要根据实际情况灵活掌握洗井方法，只要方法简单有效就可以。

二、抽水试验

抽水试验(见图 4-16)一般在洗井达到要求后进行。



图 4-16 抽水试验

抽水试验的目的在于进一步了解地热井的水温、水量(包括动水位、静水位)、含砂量及水质情况，为地热井合理使用提供基础资料。

一般采用潜水泵进行抽水试验。水量的计算采用三角堰或水表直接测量，但要求水表安装符合要求。温度测量用普通温度计即可，其他参数按照国标 GB27—88《供水水文地质勘察规范》和国标 GB50296—99《供水管井技术规范》以及有关地热矿泉水标准执行。

三、资料整理

地热井施工属于地下隐蔽工程，从设计到完工(见图 4-17)都应确保各环节技术资料齐全。完成一眼地热井大概所形成的资料包括：

- (1)前期地热井论证报告。
- (2)地热井设计(包括变更)、施工组织。
- (3)主管部门的相关手续。
- (4)地热井竣工报告(包括物探测井资料、水文地质资料等)。
- (5)各种应验手续。



图 4-17 地热井验收

第五章 常见事故的处理

钻井施工中由于遇到特殊地层、钻井液的类型与性能选择不当、井眼质量较差等原因,造成井下的遇阻遇卡,钻井时严重蹩跳、漏失等不能维持正常的钻井和其他作业的现象,均称为井下复杂情况。由于操作失误,处理井下复杂情况的措施不当等都会造成钻具折断、卡钻、脱扣、井管问题等钻井事故。井下复杂情况与钻井事故给工程施工带来很大困难,如降低生产效率、增加施工成本,严重的事故还会导致钻井工程的报废。为了确保施工的顺利进行,钻井工作者必须严格执行有关操作规程和施工设计,了解事故发生的原因和过程,掌握处理各种事故的基本技术和技能,及时采取有效的措施,防止事故恶化,有针对性地处理好事故,保证施工的安全和顺利。

第一节 钻具事故及处理^[12]

钻具事故在钻井过程中,特别是在转盘回转钻井中,是较常见的事故。钻具事故一般有钻杆和钻铤折断、滑扣、脱扣和黏扣几种。掉落在井内的钻具,俗称“落鱼”。打捞落鱼是一件十分细致的工作,需要对井下情况作周密分析,采用适当的工具和措施及时进行处理,处理不当或落鱼在井内停留时间过长会引起事故进一步恶化,使事故处理更加困难,甚至使井眼报废。

一、常见的钻具事故

(一)钻杆折断

这种钻具事故是钻井中最常见的一种,尤其是使用有细扣钻

杆时，常在其细扣根部处折断；而使用无细扣钻杆，由于粗扣钻杆接头处强度较大，使相对薄弱点移到了钻杆本体上。当钻杆受到过大的拉力、扭力时，或钻杆体上有伤痕、腐蚀等缺陷而受到较大的力时容易发生折断。

(二)钻铤折断

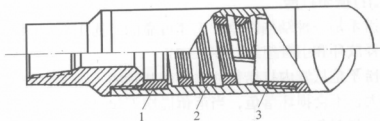
钻铤的折断则多发生在粗扣处，这是因为钻铤体部的刚性大，丝扣部分相对薄弱，又受有压力、扭力及弯曲力等复合载荷。如果丝扣加工质量不佳或操作不当都会发生在钻铤的粗扣处折断事故。

二、钻具事故的处理

处理钻具事故时，应根据鱼顶(钻具顶部位置)和井眼实际情况，选择适当的打捞工具，必要时另外设计特殊的打捞工具，以便迅速捞出落鱼，常用的打捞方法有下列几种。

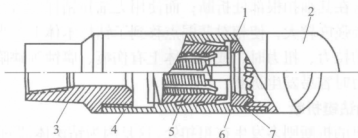
(一)卡瓦打捞筒打捞

卡瓦打捞筒是打捞工具中最常用的工具，它是从落鱼外部进行打捞的，主要用于打捞钻杆、钻铤等外径平滑的管类落鱼。捞后还可以憋压循环以便于解卡，如卡钻还可以退出卡瓦打捞筒，且操作也很容易。有螺旋卡瓦打捞筒(见图 5-1)和篮式卡瓦打捞筒(见图 5-2)。



1—“A”形密封圈；2—螺旋卡瓦；3—螺旋控制圈

图 5-1 螺旋卡瓦打捞筒



1—篮卡控制圈；2—引鞋；3—上接头；4—外筒；
5—篮式卡瓦；6—“R”形密封圈；7—“O”形密封圈

图 5-2 篮式卡瓦打捞筒

在使用卡瓦打捞筒打捞时，应首先根据落鱼抓捞部位尺寸选用卡瓦、控制圈、密封元件，并按要求组装好，确定好卡瓦打捞筒的下入位置。当卡瓦打捞筒下到鱼顶时，在缓慢向右转动的同时，下放打捞钻柱，把落鱼套入打捞筒的引鞋内，鱼顶到达带铣齿的篮卡控制圈时，慢慢转动打捞钻柱，铣去鱼头毛刺，继续下放，打捞钻柱，当卡瓦下端到达鱼头时，加压 30~50 kN，落鱼上顶卡瓦并将卡瓦胀开让落鱼通过，直到卡瓦到达落鱼的打捞位置为止，上提卡瓦打捞筒，筒体相对卡瓦上移，外筒锯齿斜面迫使卡瓦收缩，卡瓦内的牙齿便咬住落鱼。捞住落鱼后，必要时可开泵循环，但不能转动钻具以免落鱼滑脱，然后便可起钻，捞出井内落鱼。

(二) 打捞矛打捞

打捞矛是一种结构简单、工作可靠的打捞工具，它由心轴、卡瓦、释放环和引鞋组成(见图 5-3)。

打捞矛是从管内打捞钻柱本体和井管的，因为它咬合落鱼的面积较大，不会损坏落鱼，当落鱼提捞不起时，打捞矛容易松脱和退出，将落鱼丢掉。打捞矛的卡瓦内部是左旋锯齿与心轴锯齿相结合，释放环的凸缘与引鞋端面凸缘是一个安全装置，它能抵抗打捞矛的锁紧、黏结或卡住，以保证容易释放。正转则可使打

捞矛脱开落鱼。

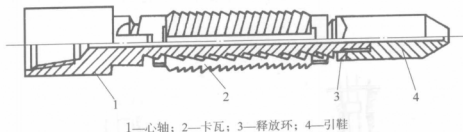


图 5-3 打捞矛结构示意图

用打捞矛打捞时首先要选择与落鱼内径相适应的打捞矛，然后慢慢下入井内打捞钻柱，直到打捞卡瓦进入落鱼体内的预定位置，使卡瓦外齿咬住落鱼内壁，便可捞出落鱼。

(三) 公、母锥打捞

在水井钻探中，公母锥(见图 5-4、图 5-5)是常用的打捞工具。随着地热钻井深度的加深，以及钻杆材料强度的提高和新式打捞工具的出现，这种方法将逐渐被淘汰。

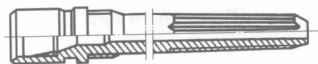


图 5-4 公锥

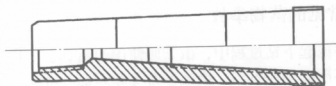


图 5-5 母锥

公锥有正扣公锥和反扣公锥及短公锥等，它打捞的是钻杆内壁，而母锥打捞的是钻杆外壁。具体打捞方法（见图 5-6）略。

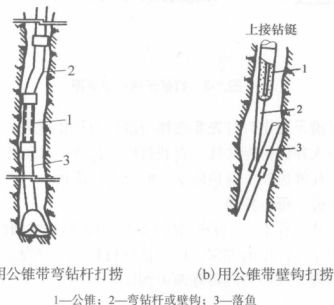


图 5-6 公锥打捞示意图

第二节 落物事故及处理

一、常见的落物事故

在钻井或起下钻过程中，由于所使用的钻具、工具质量不过关，检查不严或操作不当、措施不力等原因都有可能引起落物事故。

常见的落物事故主要有掉牙轮（包括牙轮、牙轮轴、断巴掌、

掉弹子)、垫叉、测斜仪、大锤、扳手、电缆等。

二、落物事故的处理

(一)井壁埋藏法

如果井内落物较小(如销子、弹子、刀片等),井眼不深且地层较软,成井周期很短时,可不予打捞,只需用废旧钻头将落物强行拨到井壁,挤压进井壁,埋藏起来即可。这种方法简单、省事,但不够彻底,有时落物还可能从井壁掉出来。对于大的落物、较硬的地层和在井眼较深、裸眼段较长等条件下都不宜采用此法。

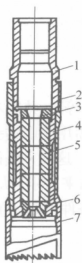
(二)磁铁打捞法

磁铁打捞法广泛用于打捞落井的牙轮、弹子、小工具等。磁铁打捞器有一个长圆筒形的永久磁铁心子,它的上下端为磁极,上端内接头与外壳用丝扣连接压紧上极板,下端由外壳与铣鞋用丝扣连接压住下极板,磁铁与外壳之间有绝缘的衬套(见图 5-7)。

磁铁打捞器接在钻杆下部,因为井眼中钻井液磁阻较大,因此打捞时应使磁铁芯子尽量靠近落物。当磁铁打捞器下放到离井底 0.5~1 m 时,循环冲孔,充分冲洗落物后停泵,然后慢慢下放,到指重表指示已触到井底时即可。此时不应加压过大以防落物被压入地层,打捞起钻时不得使用转盘或大锤猛击卸扣,以防捞获之物重新落井。

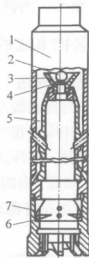
(三)反循环打捞篮打捞

反循环打捞篮是打捞牙轮和小件落物的打捞工具。筒体由内筒和外筒组成,当投入凡尔球落到球座上后,钻井液便经内筒与外筒之间的通道,从外筒上的水眼喷出,在井底形成局部反循环,将井底落物冲向打捞篮的内筒。钻井液通过内筒与外筒相连的通道流入环空,钻井液不能冲动的落物要靠铣鞋钻进取心,此时落物由岩心把它顶入筒体内(见图 5-8)。



1—接头；2—体部；3—上磁极；4—衬筒；5—磁心；6—下磁极；7—引鞋

图 5-7 磁铁打捞器



1 接头；2—凡尔球；3—凡尔杯；4—凡尔座；5—筒身；6—岩心爪；7—铣鞋

图 5-8 反循环打捞篮

反循环打捞篮打捞时，下部接铣鞋及岩心爪，操作方法是：下井前将钢球取出，然后下钻距井底 1.0 m 左右循环冲孔一段时间，之后投入凡尔球，开泵反循环开始，同时低速转动并慢慢下放到井底，如用铣鞋时，加压 10~20 kN，取心钻进 0.3~0.4 m，采心后便可将落物与岩心同时取出。

(四) 随钻打捞

随钻打捞使用的是随钻打捞杯，它能随钻头一起下钻，捞出掉在井内的钻头脱齿、断齿、弹子等粒状落物。入井时将打捞杯接在钻头和钻铤之间(尽可能接近钻头)，下钻到井底后，井内粒状金属落物经大排量的冲孔，把落物冲到杯筒上方，因钻井液流经此处时上返流速变小而使落物下沉到杯筒中(见图 5-9)。

使用方法是当钻头下到距井底 0.5 m 左右时，开泵循环，

同时用一挡速度转动慢慢下放钻柱到井底,循环 10~15 min; 停止转动和停泵 3~5 min; 随后上提钻柱重复操作 2~3 次, 打捞后不用起钻可继续钻进。

(五)一把抓打捞

一把抓是一种结构简单、制造容易、使用方便的打捞工具(见图 5-10), 常用于打捞钻头、牙轮之类的落物。

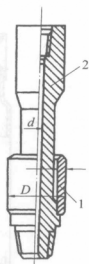
打捞时把工具下至井底稍微循环冲孔后, 下探几个方位, 找放入最多的地方, 加压 10~20 kN, 转 3~4 圈; 然后再加压 30~40 kN, 转 5~6 圈。在加压转动过程中若无憋劲, 而且悬重较快恢复, 是捞住的象征, 则可起钻。

一把抓使用不慎易断牙爪, 在起钻遇阻严重的井下不宜使用; 在井斜较大、下钻遇阻卡的井中不宜使用, 以免在下钻途中将爪包拢。

(六)平底铤(磨)鞋磨碎落物

在井底落物不易打捞的情况下, 可下平底铤(磨)鞋将井底落物磨碎, 平底铤(磨)鞋底部有辐射状牙齿(见图 5-11), 牙齿表面是硬质合金堆焊层, 使用时应加够一定压力, 用一挡转速, 保持磨铤平稳, 每磨 10~15 min, 提起划眼一次, 以便将挤入井壁的碎块划下再磨。在磨的过程中, 若发现泵压升高, 则可能是牙齿磨平, 应起钻另换磨鞋。平底铤鞋可以和磁铁打捞器交替使用, 在硬地层中磨鞋的效果较好。

总之, 落物种类很多, 打捞工具也是多种多样的, 除了上述的几种常用工具外, 有时还要根据落物的特殊形状, 设计加工专门的打捞工具。



1—主体; 2—杯筒

图 5-9 随钻打捞杯

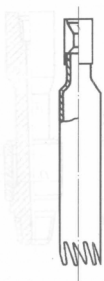
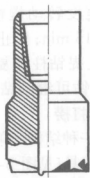


图 5-10 一把抓



箭头所指的方向视图



图 5-11 平底铤(磨)鞋

第三节 卡钻事故及处理

钻井过程中,由于各种原因造成的钻具陷入井内不能自由活动的现象,称为卡钻。地层原因、钻井液性能不好、操作不当等都可能造成卡钻,因此必须针对具体情况,进行分析,以便有效地解决。

一、卡钻的类型、原因及预防

(一)钻井过程中常见的卡钻类型

(1) 压差卡钻是指钻具在井中静止时,由于钻井液与地层孔隙压力之间产生的压差作用,使钻柱紧压在井壁泥饼上而导致的卡钻。

(2) 沉砂卡钻是由于钻井液悬浮性能不好,或处理钻井液过程中由于黏度和切力下降幅度过大,导致钻井液中所悬浮的钻屑和

加重剂沉淀, 埋住井底一段井眼而造成的卡钻。

(3) 井塌卡钻是指在钻进过程中突然发生井塌而造成的卡钻。

(4) 砂桥卡钻是由于井壁不稳定或冲孔效果不好, 使井径不规则而引起的。

(5) 落物卡钻是指井内掉入较大岩块或其他东西不能顺利地通过环形空间, 在某段井径较规则或较小的环空处卡住而造成的卡钻。

(6) 缩径卡钻是由于已钻过井段的井眼直径小于所使用的钻头直径而形成的卡钻。

(7) 钻头泥包卡钻是指在上提钻具的过程中, 因钻头泥包而遇阻所造成的卡钻。

(8) 键槽卡钻是由于孔斜和方位变化大, 形成了急弯(狗腿)而发生的卡钻。

(二)原因及预防

1. 压差卡钻^[13]

压差卡钻又称泥饼黏附卡钻(见图 5-12), 此类卡钻在钻井所发生的卡钻事故中的比例最大, 它的发生与钻井液关系最为密切。

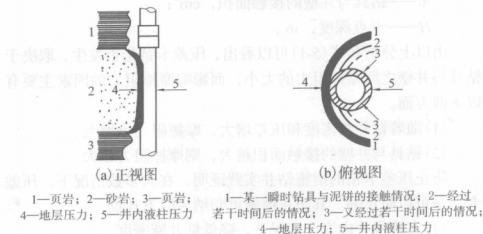


图 5-12 泥饼黏附卡钻示意图

对于压差卡钻的原因可作如下分析：当钻柱旋转时，它被一层钻井液薄膜所润滑，钻柱各边的压力均相等。但当钻柱静止时，钻具的一部分就会贴到井壁上与泥饼接触，迫使泥饼中的孔隙水流入地层，造成泥饼的孔隙压力降低，而泥饼内的有效应力则随其孔隙压力降低而增加。如果钻具较长时间停靠井壁，泥饼内的孔隙压力逐渐降至与地层的孔隙压力相等，此时在钻柱两侧则会产生一个压差，此压差等于钻井液在井眼内的液柱压力与地层孔隙压力之间的差。这种压差的产生必然会增加上提钻柱的阻力，如果该阻力超过了钻机的提升能力，就造成了卡钻。当钻具停靠在井壁上时，如果要上提钻具，其提升力必须超过某摩擦阻力才能将钻具提起。根据摩擦作用的物理原理，钻具运动的摩擦阻力可用下式表示

$$F = kA(0.1 \rho H - P_0) \quad (5-1)$$

式中 F ——摩擦阻力，kgf；

k ——泥饼摩擦系数；

P_0 ——地层孔隙压力，MPa；

ρ ——钻井液密度， g/cm^3 ；

A ——钻具与井壁的接触面积， cm^2 ；

H ——卡点深度，m。

由以上分析和式(5-1)可以看出，压差卡钻是否发生，取决于钻具与井壁之间摩擦阻力的大小，而影响摩擦阻力的因素主要有以下两方面。

(1) 随着钻井液密度和压差增大，摩擦阻力也增大。

(2) 钻具与井壁的接触面积越大，则摩擦阻力越大。

防止压差卡钻的措施钻井实践证明，在大多数情况下，压差卡钻是可以防止的。其防止措施可归纳为以下几点：

(1) 在确保井内安全情况下，降低钻井液密度。

(2) 减少钻具与井壁的接触面积。为了减少接触面积，应采取

以下措施：降低钻井液滤失量（特别是高温高压滤失量），改善泥饼质量，使其薄而坚韧、致密，并且有低的渗透率和良好的可压缩性；注意活动钻具，减少钻具与井壁的接触时间；对于直井，应尽可能把井打直，避免过大井斜角及井斜角和方位角的剧变；采用合理的钻具结构，使用螺旋钻铤，将钻具与井壁接触面积减至最小限度；对于定向井，应避免方位角剧变。

(3)降低泥饼摩擦系数。采用优质钻井液，在钻井液中加入润滑剂，使用好固控设备，降低钻井液含砂量等。

2. 沉砂卡钻

用清水钻进或黏度小、切力低的钻井液钻进时，由于其悬浮岩屑的能力差，稍一停泵岩屑就会下沉，停泵时间越长，沉砂量越多，尤其在钻速较快时更是如此，严重时就可能造成下沉的岩屑堵死环空、埋住钻头或部分钻具，形成卡钻。

沉砂卡钻的表现一般为：接单根或起钻卸开立柱后，钻井液倒返甚至喷势很大；重新开泵循环，泵压很高或憋泵；上提遇卡、下放遇阻且钻具的上提或下放越来越难，转动时阻力很大，甚至不能转动。

为了预防沉砂卡钻，应确保钻井液的性能满足清岩和悬浮岩屑的要求，随时做好设备和循环系统的检查维护，在因故停止钻进时，避免停止钻井液井内循环；缩短接单根时间，在发现泵压升高及岩屑返出量较小时要控制钻速，加大排量冲孔，停泵前要将钻具提高井底并随时活动钻具。

3. 井塌卡钻

井塌卡钻大多由以下原因造成：突然钻至破碎性地层，钻井液无法抑制坍塌；井壁已经发生坍塌，为处理井塌在划眼过程中又出现坍塌，塌块将钻具卡死；钻井过程中发生井涌，液柱压力下降，突然引起上部地层坍塌造成卡钻；钻井过程中发生井喷，井中液柱压力下降，引起上部地层坍塌；由于上提或下放钻具速

度过快造成强烈抽吸或挤压，或由于开泵过猛、钻具对井壁的撞击等原因，突然井塌而造成卡钻。

预防井塌卡钻的主要措施有：使用低失水、高矿化度和适当黏度的防塌钻井液，在破碎易塌地层适当增大钻井液密度，随时保证钻井液柱的高度；避免钻头泥包和抽吸作用引起的井壁坍塌。

4. 砂桥卡钻

松散的易坍塌或易剥落地层与胶结牢固、井径规则的地层交互，形成井径忽大忽小的所谓“糖葫芦”井眼。钻进过程中岩屑在井眼扩大部分上返速度低，不能顺利地向上携带，逐渐沉积在大小井径交错的台阶处，形成砂桥。下钻时，如下放钻具过猛、速度过快，将钻头插入砂桥，便造成砂桥卡钻，有时会堵死钻头水眼，使钻井液停止循环。

砂桥卡钻的预防与井塌卡钻相似。

5. 落物卡钻

由于井壁不稳定而掉块，或操作不小心，将卡瓦牙、吊钳牙或其他小工具掉入井内，卡于井壁与钻具或套管与钻具之间形成落物卡钻。

为了防止落物卡钻，钻井过程中应采取有效措施，保持井壁稳定；要严格执行操作规程，加强责任心就可避免发生落物卡钻。

6. 缩径卡钻

缩径卡钻常发生在膨胀性地层和渗透性、孔隙度良好的井段。由于钻井液性能不好，失水量大，在井壁易形成胶状疏松的泥饼，当泵排量小、钻井液上返速度低时，易在泥饼上面沉积较多的黏土颗粒、岩屑等，致使井径缩小。缩径卡钻的主要表现是：遇阻的位置固定，循环时泵压增大，在此位置上提钻具困难，下放容易，起出的钻杆接头的上部经常有松软泥饼。

为了防止缩径卡钻，一般采用低密度、低固相、低失水的优质钻井液，并在下钻遇阻井段划眼以扩大缩径处的直径，常活动

钻具则可有效地预防缩径卡钻。

7. 钻头泥包卡钻

钻头泥包是由于在易吸水膨胀的泥岩地层钻进时，由于环空返速过低，钻井液黏度高，滤失量大，吸水膨胀的泥岩岩屑黏附在钻头上而不能及时被上返的钻井液冲洗掉而造成。

防止泥包卡钻可采取以下措施：选用合适的环空返速及时携带岩屑；依据地层特性，选用抑制性强的钻井液；在钻井液中加入钻头防泥包剂，改善钻井液的润滑性能，降低岩屑在钻头上的黏附力等。

8. 键槽卡钻

键槽卡钻(见图 5-13)多发生在硬地层中，井斜和方位变化大、形成了急弯(狗腿)的地方。钻进时，钻柱紧靠狗腿段旋转，起下钻时钻柱在狗腿井段上下拉刮，在井壁上磨出一条细槽(形如键槽)，它比钻杆接头稍大但比钻头直径小，起钻时钻头拉入键槽底部被卡住。键槽卡钻发生前即可发现钻杆接头偏磨严重，下钻不遇阻，钻进正常，泵压也正常，但起钻到狗腿处常遇卡。随着井深的增加而愈加严重，能下放但不能上提，严重时即可卡死。

为了防止键槽卡钻的发生，必须首先保证井眼质量，避免出现狗腿段；起钻时或再次下钻时应在键槽井段反复划眼，及时破坏键槽的形成，并在起钻到键槽井段时低速慢起，严禁使用高速提升。

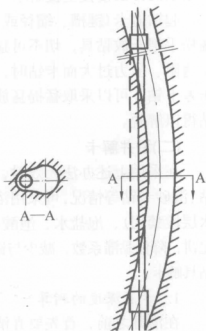


图 5-13 键槽卡钻示意图

二、卡钻事故的处理^[12]

卡钻事故发生后,首先要根据上提、下放、转动钻头情况,开泵循环情况,以及了解到的井眼情况和卡钻前的各种现象进行分析,准确判断出卡钻的原因,再采取相应的措施。但不管哪种性质的卡钻,都要设法调整钻井液的性能,及时清除岩屑,清洗井眼。一般常用下述几种方法进行解卡。

(一)上提、下放和转动钻头解卡

在循环钻井液洗井的同时配合活动钻具,若卡得不严重时可以得到解决。但活动钻具要针对不同类型的卡钻来进行,如果是沉砂卡钻或井塌卡钻则不要上提钻具,以免卡得更死,这时可以下放和旋转钻具,并想法憋开环空通道,使钻井液上下循环,用倒划眼的方法慢慢上提解卡。

起钻遇卡(键槽、缩径或泥包卡钻)时,可提到原钻具重量后猛松手把下放钻具,切不可猛力上提,以免将钻头卡得更死。下钻遇阻、压力过大而卡钻时,则应用较大的力量上提解卡;对于压差卡钻,可以采取猛提猛放和转动钻具的方法使较轻的黏附卡钻得以解脱。

(二)浴井解卡

在采用上述办法无效时,对于压差卡钻、泥包卡钻、缩径卡钻、沉砂卡钻等情况,可采用浴井解卡。这种方法是向井内泡油(含水层段禁用)、泡盐水、泡酸或采用清水循环等方式,泡松黏稠的泥饼,降低黏滞系数,减少与钻具的接触面积,减小压差,从而活动钻具解卡。

1. 卡点深度的测算

在浴井之前,首先要弄清卡点的深度,这可以根据弹性材料受拉时的拉力与伸长量之间的关系实测出卡点的位置,先用大约以一定的力上提钻具,测出钻具受此拉力时的伸长量,根据相关

公式可算出卡点井深。

(1) 当井内只有同一种钻杆类型时, 采用以下公式计算卡点深度

$$L = EA \Delta L / (10^3 F) \quad (5-2)$$

式中 L ——卡点以上钻杆长度, m;

E ——钢材弹性模量, 取 20.6×10^4 MPa;

A ——钻杆截面面积, cm^2 ;

ΔL ——钻杆的绝对伸长量, cm;

F ——钻杆连续提升时净拉力, kN。

(2) 井内为复合钻具时, 卡点深度计算。

① 通过大于钻具重量的实际拉力, 量出钻具总伸长量 ΔL (可以多拉几次, 使之更加准确, 用平均法算出 ΔL)。

② 计算在该拉力作用下, 每段钻具的绝对伸长量 (假设有三种钻具):

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_1 &= L_1 F \times 10^3 / (EA_1) \\ \Delta L_2 &= L_2 F \times 10^3 / (EA_2) \\ \Delta L_3 &= L_3 F \times 10^3 / (EA_3) \end{aligned} \right\} \quad (5-3)$$

式中 ΔL_1 、 ΔL_2 、 ΔL_3 ——在拉力 F 下的绝对伸长量, cm;

L_1 、 L_2 、 L_3 ——每种钻具的长度, m;

A_1 、 A_2 、 A_3 ——每种钻具的截面面积, cm^2 。

③ 分析 ΔL 与 $\Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3$ 值的关系:

若 $\Delta L \geq \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3$, 说明卡点在钻头上;

若 $\Delta L \geq \Delta L_1 + \Delta L_2$, 说明卡点在第三段上;

若 $\Delta L \geq \Delta L_1$, 说明卡点在第二段上;

若 $\Delta L \leq \Delta L_1$, 说明卡点在第一段上。

④ 计算 $\Delta L \geq \Delta L_1 + \Delta L_2$ 的卡点位置:

先求 ΔL_3

$$\Delta L_3 = \Delta L - (\Delta L_1 + \Delta L_2)$$

计算 L_3' 值

$$L_3' = EA_3 \Delta L_3 / (10^3 F)$$

L_3' 为第三段没有被卡部分的长度。

计算卡点深度

$$L = L_1 + L_2 + L_3'$$

⑤其他情况可类推。

2. 溶液用量计算

知道卡点深度后, 计算出所需泡液量, 并将其注入卡钻井段, 使黏附等卡钻解除。一般情况要求注入泡液量要超过卡点以上 100 m, 卡点以下钻具全部泡上溶液, 并使钻杆内的溶液面高于钻杆外的液面。

$$V = 0.785 k (d^2 - d_1^2) H_1 + 0.785 d_2^2 H_2 \quad (5-4)$$

式中 V ——溶液用量, m^3 ;

k ——井径扩大系数, 一般取 1.2~1.5;

d ——钻头直径, m;

d_1 ——钻杆外径(不同型号时分别计算), m;

d_2 ——钻杆内径(不同型号时分别计算), m;

H_1 ——环空溶液高度, m;

H_2 ——钻杆内溶液高度, m。

压入溶液后, 每隔 10~15 min, 替入少量钻井液, 使溶液上返, 以加强溶液的渗透浸泡作用。在浴井期间要配合活动钻具, 浸泡 6~12 h 后如不能解卡, 可替出溶液重新浸泡或加入其他溶剂。

(三)环刀铲除法

当环空能下入另一套钻具时, 可采用环刀从井口套在井内钻柱上, 用另一套钻具送下环刀, 以铲除钻具与井壁的黏附之处, 此法一般用于千米左右的压差卡钻。采用时要倍加小心, 防止井

内事故复杂化。

(四)上击、下击解卡

在钻进中若遇到垮塌、黏性、膨胀性等易卡地层，可在钻杆与钻铤之间或钻铤之间接上震击器，一旦遇卡，便立即下击或上击解卡。

起钻中遇卡，如缩径、键槽等引起的卡钻经活动不能解除时，可以在卡点处倒开钻具，再接下震击器，对扣后，下击解卡。然后循环冲孔，上提钻具，如仍有卡阻现象时，可以转动钻具倒划眼轻轻上提。

下钻过程中遇阻，未能及时发现而导致卡钻，或较轻的泥饼黏附卡钻时，均可用上击器向上击震解卡。

(五)倒扣、套铣解卡

遇到严重的卡钻时用以上方法不能解除且不能循环冲孔时，常用倒扣、套铣的方法来取出井内全部或部分钻具。倒扣是指用转盘倒转，将井内正扣钻杆倒出。每次能倒出的钻杆数量决定于井内被卡钻具丝扣松紧是否一致。通常希望从卡点处倒开。对卡点以下的钻具要下套铣筒，将钻具外面(即钻具与井壁的环形空间)的岩屑或落物碎屑等铣掉，然后再倒出钻具，这是一种比较复杂的处理办法，费时较长。其倒扣、套铣的步骤如下：

(1)将卡点以上钻具重量全部提起(并稍大些)，使卡点附近钻具不受拉力和压力，然后倒转转盘，将钻杆丝扣倒开，起出井外。

(2)如果倒出的钻具还不到卡点处，可用反丝钻杆下接反扣公锥(必要时在公锥上面安安全接头)，下到井内钻具处造扣，然后上提，使卡点处钻具不受力，再反转转盘倒扣，如此反复进行直到卡点以上钻具全部倒出，再进行套铣。

(3)套铣时使用套铣筒，要选择铣鞋、铣筒的外径比井眼稍小，其内径要比钻杆接头外径大，如套铣 114 mm (4 $\frac{1}{2}$ in) 的钻杆时可

用 165 mm($6\frac{5}{8}$ in) 的套铣筒, 套铣筒的长度一般为 50 m 左右, 也有更长的, 接在钻杆下面下入井内, 套住井内钻具后再行套铣, 套铣一个套筒的长度后起钻, 再下入反丝钻杆及反丝公锥进行打捞, 如此反复进行(套铣—反丝打捞—套铣)直到把井内全部钻具倒出。

(六)爆炸倒扣、套铣

这是处理卡钻事故的一种新的倒扣方法。首先测出卡点位置, 然后用电缆将导爆索从钻具内孔送到卡点以上第一个接头丝扣处, 在导爆索中部对准接头的同时, 将钻具卡点以上的全部重量提起, 并给钻具施加一定的倒扣力矩, 点燃爆索使其爆炸; 导爆索爆炸时产生剧烈的冲击波及强大的震动力, 足以使接头部分发生弹性变形, 及时把扣倒开, 这与钻杆接头卸不开时, 用大锤敲打钻杆母接头后就可卸开的原理是一样的。同时, 由于导爆索爆炸产生大量的热量, 使钻杆接头处受热, 熔化其中的丝扣油, 并产生塑性变形, 也有助于卸开丝扣。

这种方法具有安全、可靠、快速、钻具一般不易破坏、卡点以上不需要反丝钻杆和打捞工具等优点, 同时加快处理卡钻的速度, 但要严格控制炸药量, 并合理操作, 倒扣后铣套、打捞。

(七)爆炸、侧钻新井眼

当采用上述各种方法无效, 或卡点很深, 用倒扣方法处理很费时间, 会使井眼情况严重恶化时, 可将未卡部分钻具用炸药炸断起出, 然后在留在井内的钻具顶上打水泥塞, 再侧钻形成新井眼。

地热井侧钻新井眼时, 一般造斜处距地面垂距要大于 300 m (主要考虑泵室长度)。选斜工具可采用两种: 一是利用偏心鞋使用原钻具自然造斜; 二是利用弯接头, 接螺杆马达造斜。根据孔深、孔径及井管外径选择造斜角度等, 以便终孔后为成井做准备(打构造地热井, 注意方位角及顶角大小)。

第四节 成井过程中常见事故及处理

一、事故及预防

(一)常见事故

在地热井成井过程中,由于井深大、环节多,稍有不慎就有可能出事,在成井过程中一般会遇到以下事故。

1. 井口坍塌

一般发生在井管下入后,冲孔换浆后期投砾前或投砾过程中。对于填砾地热井,导致无法填砾、止水等。

2. 砾料棚架

一般发生在投砾过程中,由于速度快或环空流速变化,棚架在变径或井口等处。

3. 滤管变形

一般发生在由于下管速度过快,管内与管外形成内外压差造成滤管挤扁时,或者由于操作者不慎将过大的压力压在了滤管部位而发生变形。

4. 井管拉断

一般发生在所用井管不符合质量要求时,或下管到底后,由于其他原因想把井管全部起出而造成井管拉断。

(二)事故预防

对于上述几种情况要分别采取以下预防措施:

(1)对于井口坍塌事故,钻井前了解上部地层(30 m 以内)特性,把表层套管(孔口管)下到稳定地层,套管底部要座封好,防止钻井液从外部返出,保持孔口水柱压力。

(2)控制投砾速度,及时调整泥浆性能,注意泵量大小。

(3)下管至井深时,控制下管速度,下管前调整好井内泥浆性

能；下管到底时控制井管压力，防止压挤滤水管部位，钻压仪要反映准确。

(4) 选择符合质量的井管；井口连接到位；下管时禁止猛拉、猛放冲击井管；从井内起拔井管时，要注意井管的抗拉强度及地层的摩擦力影响，一般情况不得强力起拔。

二、事故的处理

(一)井口坍塌

对于成井过程中的井口坍塌事故，要分情况进行处理。

如果是井口管下部坍塌，不对井台产生影响时，可采用泵吸或气举反循环法，把坍塌物排出，确保环空畅通。具体方法是：在井管与孔口管环空间下入一定尺寸的钻具，下至坍塌部位，启动反循环把坍塌物抽出来。

如果泥浆从孔口管外大量返出，处理坍塌将影响井台稳定，而此时还没有完成投砾时，可暂不处理井口。可采用长导管法，穿过坍塌井段，用导管法将砾料填入，之后再处理。

(二)砾料棚架

当发现砾料棚架时(观察泵压表，不该压力大时)或堵在井口下不去时，首先要检查泥浆密度是否增大、孔口是否坍塌、环空流速是否变大等。

如果由于泥浆密度变大，使砾料棚架不能顺利下沉，应及时调整泥浆性能，以确保砾料沉降。

如果井口坍塌，应对井口进行处理或采用长导管法投砾。

如果是由于泵量过大造成棚架，应调整泵量，使砾料下沉。

(三)滤管变形

当滤管变形，导致冲孔钻具不能下入时，要起拔井管，调整泥浆性能，控制下管速度、重新下管，合理掌握井底压力。

如果井管起拔力超过自身重量而不能拔出时，分析井管受力

情况，首先选择滤水管上部，采用割刀割断井管或炸断，起出井管；若井管还不能起出，可采取割取第二刀或第二次炸管；之后，从起出的井管上部经处理后进行侧钻，钻出新的井筒，重新成井。

(四)井管拉断

根据井管剪断位置，分析井内情况，断面以上井管出井后，采用捞取法考虑能否打捞出井内井管。若能打捞出，可重新下管；若打捞不动，可考虑切割或爆破来处理井内井管。或者，孔内井管在取水层以下时，可采取侧钻成井技术，钻出新的井眼，采用贴砾管或非填砾技术。打构造水时，要注意方位角及顶角选择。

第六章 旧井修复技术

第一节 研究对象及仪器

美国、日本、德国等发达国家，在大力研究地下水资源开发新设备、新仪器的同时，重视旧井修复和维护方面的工作，并有专门的修井公司。我国在现代水井工程学领域，注重了钻井工艺和方法的研究与应用，但在旧井修复技术研究与开发方面，国内还没有引起足够的注意和重视，更没有把它作为一门专业学科来研究和发展。因此，进行旧井处理工程技术的研究与开发，并使之科学化和规范化，既能使众多的旧井或报废井起死回生，被重新利用，又能为地方经济服务，具有重要的实用价值和现实主义。

一、旧井处理研究的对象

根据目前情况，旧井处理工程研究的对象是一般供水管井、地热井、矿泉井等在使用过程中出现问题而不能正常使用的管井。所要解决的问题包括大量涌砂、水量减小、水温下降、地下水污染、井内落物及金属井管腐蚀等。所涉及的基础理论主要有地层压力平衡理论、材料弹性力学理论、机械设计与制造、化学、环境科学、金属腐蚀学等。由此可见，旧井处理工程是一门综合性的多学科交叉的科学。

二、旧井处理工程主要检测仪器

根据国内实际情况，在旧井处理工程中可选用的仪器主要有

地球物理测井仪器及井下彩色成像测试仪器等。在此,主要介绍 SJ-2 型井下彩色电视检测系统(见图 6-1)。

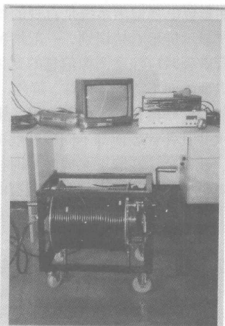


图 6-1 井下电视

该系统包括井下探头、系统控制器、彩色监视器、编码计数器、专用电缆、绞车、录像机等。它是采用固体 CCD 摄像、微机自动控制及集成电路等技术组合而成。其操作过程是:在 220 V 电源工作条件下,把自带光源的防水摄像探头通过电缆用绞车送入井下,在地面监视器上可以直观看到井下的一切情况。

(一)主要技术指标

探头直径	120 mm
探头长度	700 mm
检测深度	0~1 000 m
最佳分辨力	0.1 mm
工作温度	50 ℃

该仪器由天津大学研制。

(二)图像解释

SJ-2 型水井彩色电视检测系统是直观的图像信息,井内的情况可以通过系统显示屏幕直接识别,一般情况不需要解释。但在检测涌砂和井管破裂时应注意图像信息的变化和立体效应,若在井内某段突然出现画面不清晰且呈红、黄色,并有点状悬浮物,则说明该段很可能是涌砂段;如果画面变黑,则说明是淤泥或泥浆。长期使用的水井其井管表面都不同程度地沉积一层垢物或铁锈,颜色呈灰白、铁锈色,在起下泵或洗井时往往碰撞井管,使之沉积物碰掉呈黑色,在用井下电视判别破裂时容易混淆,此时应特别注意管壁上黑色物的立体效应,若没有立体感则不是破裂所致(见图 6-2)。

(三)井管破裂、错位及腐蚀等形状定量确定

检测系统显示器反映的图像不是井内实体的实际大小,它像照相机一样,显示的是清晰的影像,如果有必要定量确定实体物大小时,则可通过下式来测算

$$S=B \cdot d_2 / d_1 \quad (6-1)$$

式中 S ——井内实体物尺寸, mm;

B ——系统显示器上实体尺寸, mm;

d_1 ——系统显视器上反映的井管内径, mm;

d_2 ——井管实际内径, mm。

(四)操作注意事项

(1) 下探头操作绞车时要匀速缓慢,避免电缆和井口滑轮产生滑动而影响测试精度;或防止落物把探头碰坏。

(2) 探头与电缆是通过 10 芯航空插头连接,在连接时要按标志缓慢插入,以免损坏插头造成短路而击穿绝缘板。

(3) 电缆和探头使用后要及时用干净棉布擦拭干净,防止摄像头受潮。

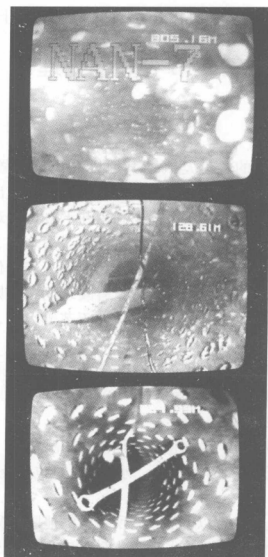


图 6-2 井下电视成像图

(4) 探头和电缆进水(警报器响)时,应迅速提出井口进行处理,待查明原因彻底晾干处理后使用。

(5) 注意检查探头密封及密封圈、电缆的磨损情况。

(6) 运输和搬动时,注意轻拿轻放,以免过大的振动损坏仪器。

(7) 井管弯曲严重或井内有落物时, 不可强行下入。

第二节 旧井处理

一、涌砂井

涌砂井处理的关键是判断其原因及出砂位置。通过短期(6~24 h)的抽水观测和利用井下电视检测来判定出砂原因和位置, 采用排除法逐一检查。首先利用井下电视直观判定是否因为井管破裂而引起涌砂。其检测重点是: 静水位、动水位区间井管的连接处, 下泵位置, 动水位上下处, 变径位置, 井管所有连接处。通过井下电视检测若没有发现问题, 则可考虑由于砾料下沉、井内压力平衡破坏、成井工艺等因素, 其主要工作和程序是:

(1) 了解和掌握原始资料及当时成井情况。主要收集的资料有: ①钻井柱状图; ②井管材料; ③砾料结构; ④滤水管类型; ⑤地层特性及交井时的含砂量等。

(2) 检测静水位、动水位及井内沉渣情况。

(3) 了解正常开采时的水量、水温、下泵位置及使用过程的异常情况。

(4) 了解止水位置以下滤水管所对应的地层情况。

掌握上述情况后, 抽水观察出砂的时间, 另外计算排出静水位至动水位水体积所需的时间和各段含水层中的砂粒上升到井口所需的时间。一般情况下, 泵启动在1~5 min后出砂, 则出砂位置可能在下泵位置附近; 5~30 min后出砂, 则出砂位置可能在中、下部。当然必要时可采用分段抽水来详细判定具体出砂位置。

出砂位置确定后, 结合原水井结构可参考表 6-1 方案进行处

理。当实管破裂时可用比原井管小一级或两级的实管进行修补；当滤水管位置出砂时，如果可能则下入贴砂管进行修补；如果出砂位置对水量、水温不构成大的影响，也可采用实管封死出砂位置。具体应根据该井的实际状况（井深、井斜、内径等）选择最佳方案。一般旧井井内情况比较复杂，设计加工止水（砂）密封装置是关键，此项工作质量的好坏将直接影响旧井处理的成败；另外，补管前要进行探井，探井装置的外径应比补井材料的最大外径大 10~20 mm，长度在 6~12 m。采用补管技术封隔涌砂井，补管设计的原则是“安全、简单、实用、可靠”。

表 6-1 涌砂处理技术方案选择^[14]

出砂位置	处理方法	特 点
井口下部附近	井口悬挂法	难度小，安全可靠
变径下部附近	变径悬挂法	井斜时难度大，安全可靠
变径上部附近	变径坐底法	难度小安全可靠
井底上部附近	井底坐底法	井斜时难度大，安全可靠
井内任何位置	局部处理法	成本低，技术含量高
井底井管错位	井内投砂法	简单易行，成本低，效率高
实管任何位置	高压灌注法	不改变结构，技术含量高

二、水量减小

一般情况下，水井（地热井）正常使用 5 年后都会不同程度地导致水量减小，其成因和类型较多，但主要有以下几方面：

（1）地层中的固相（黏土、砂粒、断层充填物等）、水中的有机物等在水流环境及重力作用下沉淀造成淤积。

（2）地下水中含有大量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等，这些离子与水中的 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 等发生反应，沉淀物充填到裂隙、滤水管等部位。

(3) 地下水中 Fe^{2+} 的存在, 遇空气时 $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$, 并以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (黄色沉淀物) 出现, 可沉积形成化学淤泥, 堵塞取水通道。

(4) 地下金属井管腐蚀和结垢是普遍存在的问题, 井内沉淀胶结会加速金属腐蚀, 腐蚀产物又会形成新的结垢物, 二者同时伴生。特别是腐蚀产物形成的结垢物具有很高的强度, 其危害和处理的难度最大。

(5) 井内堵塞的另一种因素还有微生物黏泥。在井内产生这种堵塞物的微生物主要是铁细菌(好氧菌), 和硫酸盐菌(厌氧菌), 这些微生物一方面因为自身大量繁殖产生结垢, 另一方面其分泌物产生“微生物黏泥”与其他固相混合黏附在井壁上而形成胶结物。

井管中上部最常见的橘黄色“凸状锈瘤”则是由于铁细菌大量生产繁殖而引起的。

(6) 井内掉入的杂物在变径处聚集, 从而增加了出水阻力, 影响井的水量。

(7) 水位下降。由于大量或过量开采地下水而引起。

实际工作中, 根据不同的情况及成因可采用单一或联合方法处理水量减小问题。一般所使用的方法见表 6-2。

表 6-2 水量减小处理方法

处理方法	运用范围	作用	效果
空压机振荡洗井	井内淤积与沉淀	排渣疏通含水层	成本低, 效果较好(浅井)
钢刷刷洗井壁法	井壁结垢与锈蚀	清除杂物	效果较好
CO_2 洗井法	淤积、轻度结垢	排渣、负压作用	成本低, 效果好
活塞拉洗法	轻度结垢	清除结垢, 疏通含水层	用于浅井效果好
控制爆破法	结垢、砾料胶结严重	破坏其强度	效率高, 风险大, 效果好
酸化洗井法	基岩地层或深井除锈	化学反应清洗	效果好, 工艺复杂
射孔法	含水层严重堵塞	扩大透水面积	效果好, 成本高

值得注意的是,随着井深的增加,尤其是地热井的增加,传统的洗井方法(如空压机振荡洗井)不能很好地解决问题,在处理井深大于 500 m 的井时,应采用联合洗井法进行处理才能收到较好的效果。

对于上千米深的地热井,建议采用控制爆破法、酸化处理法及射孔法来增大水量。

爆破洗井法(见图 6-3)是利用炸药在瞬间产生的高温高压

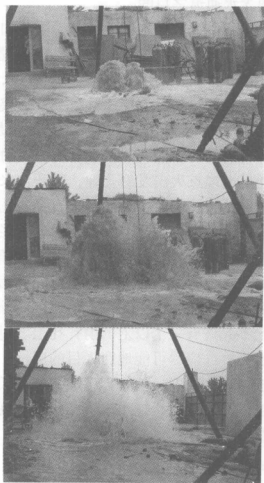


图 6-3 孔内爆破

气体的冲击波冲击井壁四周,使井壁胶结物及井周胶结强度破坏,同时形成较大的负压使胶结堵塞物排除,增大水量。采用此法一定要有专业人员控爆,建议采用石油物探地震爆破技术,一是安全、专业,二是起爆快速。

酸化处理法是一种化学洗井方法,除用于基岩地层外,也用于非基岩地热井洗井。由于地热井水温高,矿物质含量高,形成胶结物的速度快、硬度高,而且大多数同酸进行化学反应溶于水从而从而达到疏通含水通道之目的。

在实际酸化洗井中,常采用工业盐酸,同时加入一定量的甲醛(防腐剂)来进行酸化洗井,采用此法时要注意用量及操作安全。

射孔法(见图 6-4)是将射孔枪下到含水层部位,在地面点火引爆射孔弹,将井管(砾料)与含水层一并射穿,形成连接井眼和含水层的通道。射孔的工具是射孔枪。常用的射孔弹是聚能射孔弹,也有使用子弹进行射孔的。射孔时用绞车将缆式射孔枪下到预定深度,由地面通过电缆点火击发射孔弹,射开含水层。

射孔的参数包括射孔密度、射孔孔道直径、孔道深度、射孔相位角、目的层射开长度等。这些参数是由岩石强度、目的层性质、井管强度等决定的。射孔密度一般为 $10 \sim 20$ 孔/m,最大可达 36 孔/m。射孔孔道直径一般为 $10 \sim 16$ mm,最大可达 25 mm。孔道接近圆柱形。射孔的相位角常在 $72^\circ \sim 180^\circ$,沿螺旋状分布。在同一横截面上不允许有一个以上的射孔孔道。射孔的深度除应穿透井管、环状带外,应尽可能地穿入目的层。

射孔时应根据滤管长度、堵塞程度决定射孔长度及射孔孔道直径、射孔密度等。射孔后,抽水时若含砂量过高,可采取其他措施减小含砂量。

三、井管破裂

井管破裂的主要类型有:局部腐蚀和穿孔,泵头(泵管法兰)位

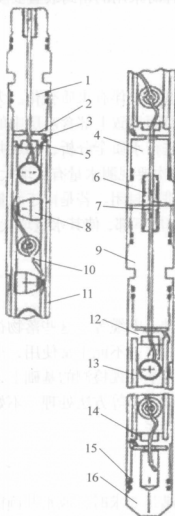
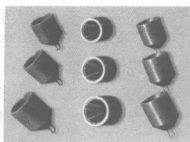


图 6-4 射孔枪示意图

序号	代 号	名 称
1	1271-1	枪头
2	1271-2	索卡
3	GB72-88	定位螺钉
4	1271-3	公母接头
5	GB65-85	螺钉
6	1271-4	扶正体
7		传爆管
8		射孔弹
9	1271-5	双公接头
10		导爆索
11	1271-10	枪体
12	1271-6	上定位盘
13	1271-7	弹架
14	1271-8	下定位盘
15	GB3452.1-82	密封圈
16	1271-9	枪尾

置与井管磨(碰)损, 连接部分脱节

或错位。无论是哪一种原因造成的井管破裂，大都会引起水井大量出砂、出泥、出砾料或水温下降、水质污染等。其处理关键是：首先利用井下电视进行检测，准确判断其位置，以便确定修补方案；当井深大于井下电视探测深度或由于水温等原因不能使用井下电视时，要采用其他方法测试，如石油测井技术等；其次，结合原井结构等实际情况对破裂处进行修补。修补时采用的密封装置要安全、简单、实用、可靠。

四、水温降低

对于地热井，一般情况下，水温降低时常伴有水质变化。大多数情况是由于取水层以上井管出现破裂而导致上部含水层中的水进入井内。当发现水温降低后，首先进行水质全分析，同成井时的水质情况对比，看水质有无变化；其次要观测水量有无增大；之后采用井下电视找到具体漏失位置，进行封闭。若是由于水量变小而导致的水温降低，要重点处理含水层下部，使其水量增大，水温自然就会上升。

五、落物处理

常见的井内落物有泵头、泵管、泵轴、电缆等。这些落物往往卡在变径位置或井内的其他地方，造成水井不能正常使用，严重时导致水井报废。对于这类问题，在井下电视检测的基础上，加工专用工具，采取套、抓、钩、锥、吸、卡等方法处理。不好处理时，可采用磨铣的办法消灭或插入井底。

六、侧钻成井技术

当采用多种处理方法，水井仍不能满足要求时，或水井确已报废（对于浅井而言，水井的报废带来的损失相对小些，而对于深井（大于 1 000 m），且使用年限又不长，如果报废则损失惨重）。

在这种情况下,根据井的实际情况可考虑采用侧钻技术,即在老井眼取水层上部某一位置侧钻成井,以减小原井报废的损失,从而使侧钻后的水井成为新井。

近年来,随着施工地热井深度的增加,有时在井筒将完成时,由于某种事故而导致井底钻具无法打捞出孔,此时经过选择含水层以上某位置,打水泥塞后,进行造斜钻井,穿过含水层而终孔,最后成井,主要技术指标满足了要求;另外,结合石油钻井中套管开窗技术的应用,从此把侧钻成井引用到地热井施工中来。

所谓侧钻成井就是在已下或未下井管的某一位置,下入专用工具,采用铣削方法,在井管或井壁上定向铣出一个窗口(其孔为椭圆形)或铣去一段井管,使原始地层重新裸露成孔之后,完成后期成井,达到温度、水量等满足要求的过程。关于侧钻成井过程不再阐述,在此着重叙述侧钻开窗工艺及有关工具。

井管侧钻开窗,目前有两种方法,一种是采用斜向器(见图 6-5)在井管一侧定向开孔,另一种是用扩张式工具将一段井管铣掉。

(一)用斜向器进行井管开窗

1. 简易井管开窗工具及施工步骤

(1)确定开窗位置(深度、方法)。

(2)打水泥塞。在拟开窗位置处以下打 50 ~ 100 m 长的水泥塞。

(3)探井和洗井。用大于斜向器外径及长度的探井器(岩心管)通井,并充分洗井。

(4)下斜向器。工具的连接如下:钻柱+送入器+斜向器+地锚。用钻柱送入井内到预定位置(水泥塞顶部)后,注水泥返至斜向器以上



图 6-5 斜向器

10 m 左右；然后加压剪断连接送入器与斜向器的销钉，起出钻柱及送入器，候凝 2~5 天。

(5) 井管开窗。钻去斜向器以上水泥，用初始铣鞋(见图 6-6)沿斜向器铣井管一侧，最后用锥形铣鞋修整窗口。

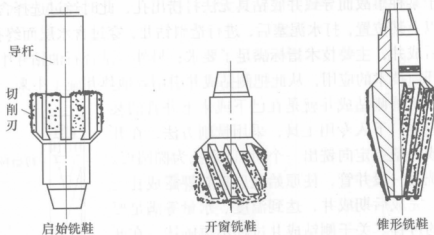


图 6-6 套管开窗铣鞋

(6) 侧钻及成井。

当开窗的方位无要求时，用一般的造斜器即可。当开窗方位有一定要求时，要用钻杆定向下入造斜器。这种方法定向效率低，误差较大。

2. 固定锚式开窗工具及施工步骤

这种方法的施工程序(见图 6-7)与上述方法大致相同，但可用仪器(陀螺测斜仪)调整方位。其施工步骤如下：

- (1) 在适当位置打水泥塞。
- (2) 斜向器及地锚(钻柱+送入器+斜向器+地锚)至水泥顶部。
- (3) 柱内下入测量仪器测定斜向器工作面方位后，钻柱不得转动。
- (4) 定斜向器进行注水泥工作，使地锚固定，注毕加压剪断送

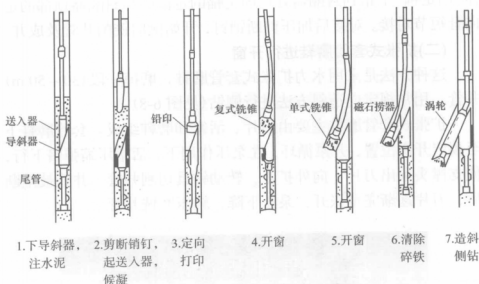


图 6-7 开窗施工程序示意图

入器与斜向器销钉，提出钻柱与送入器，候凝 2~5 天。

(5) 铤鞋进行井管开窗及成井。

3. 卡瓦封隔式地锚开窗工具及施工步骤

以上两种方法须打水泥塞及注水泥封固地锚，工序较多。用卡瓦封隔器式地锚(见图 6-5)可免去两次注水泥作业，从而简化程序。所用工具卡瓦式封隔器(其顶部有定向鞋短节)和固定锚(上部用丝扣与斜向器相连，其下有定向鞋可与封隔器对接)。施工步骤如下：

- (1) 封隔器座封在预定位置(代替打水泥塞)。
- (2) 测量仪器测定封隔器定向鞋短节键的方位。
- (3) 调整斜向器工作面与固定锚定向鞋的相对位置，使固定锚的定向鞋与封隔器短节的键槽对接后斜向器的工作面应在预定的方位。

(4) 斜向器及固定锚，其工具组合如下：钻柱+初始铤鞋+斜向

器+固定锚。下钻到封隔器处使固定锚的定向鞋与封隔器顶部的定向鞋短节对接。对接后加压剪断销钉，开始侧向铣削井管及成井。

(二)扩张式套管磨鞋进行开窗

这种方法是采用水力扩张式套管磨鞋，磨掉一段(30~50 m)井管，用常规定向造斜方法进行侧钻(见图 6-8)。

扩张式套管磨鞋主要由刀片、活塞和磨鞋组成。套管磨鞋下至预定开窗位置，开泵循环，在泵压作用下，活塞压缩弹簧下行，使支撑头顶出刀片，向外扩张，转动钻具切割井管。井管被割断后，刀片逐渐完全张开，泵压下降，轻压磨铣井管。

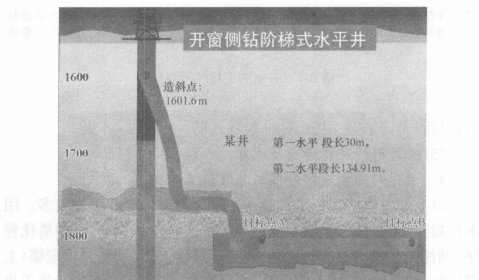


图 6-8 开窗侧钻示意图

第七章 技术展望

第一节 气举反循环技术的推广应用

水井气举钻井技术操作简便、变换工艺容易,具有钻进效率高、钻头寿命长、成井质量好、适应性强等一系列优点,是一种易于掌握、便于推广应用的钻井方法。为此,许多国家广泛采用了这种工艺方法。

我国于 20 世纪 80 年代初期对该项技术进行了应用研究,取得了突破性的进展,实践证明它是水井(地热井)钻井的先进方法之一。它的推广应用,有助于解决复杂地层正循环钻进无法实现的难题,对于提高钻进效率、降低钻井成本、减少孔内事故等,有着十分重要的实际意义。

一、气举反循环钻井技术的实现过程

气举反循环钻井是将压缩空气沿双壁气水龙头、双壁主动钻杆、双壁钻杆的环状间隙从气水混合处喷入管内,这时压缩气体膨胀,液气混合,形成一种密度小于液体的液气混合物。由于气体不断压入封闭在管内的液体中,使得管内的液气混合物密度同井内的液体产生压差,从而将气、液、固三相流以较高的流速带出管外,排入沉淀池。沉淀后的钻井液再流向井内,如此不断循环形成连续钻进的过程。

气举钻井技术最大的特性是要求管路平直,故管路不易堵塞,即使堵塞了也易于排除,另外携带上来的三相流不流经任何工作

机械,设备磨损小。在循环管路,特别是双壁主动钻杆以上的管路,各处压力都高于一个大气压,所以不会像泵吸反循环那样,因管路局部密封不严,漏气而使冲洗液循环中断。因此,它有以下特点:

(1)钻进效率高。由于气举反循环钻进冲洗液在钻杆内的上返流速高于正循环 10~50 倍,因而排渣速度快,井底干净,减少重复破碎。

(2)实现了连续取心、取样,判层及时准确。所谓连续取心、取样就是边钻井边取心(样)。这种方式因其冲洗液的流向与岩心(样)进入内管的方向一致,避免了钻井液对岩心的正面冲刷和液柱压力对岩心所造成的挤夹和磨损,提高了岩心完整性和纯洁性;获取的岩心部位准确,使所钻地层层位清楚,划分含水层埋深、位置、厚度精确。从使用过的钻头分析,证明岩心(样)均能及时返出地表,不存在重复破碎,且采取率达 100%。

(3)纯钻时间长。在基岩地层全面钻进纯钻时间利用率一般可达 80%~90%,台班进尺大幅度提高;气举反循环台班效率可达 10~20 m,是正循环钻进的 2~4 倍。

(4)减少成井时间,提高成井质量。实践证明,凡是采用气举反循环钻进工艺施工的水井,井底干净、孔斜小、洗井时间短、水量大。

(5)钻头寿命长。由于井底干净,保证钻头始终在新鲜的岩面上工作,不产生重复破碎,减轻了钻头磨损,大大延长了钻头寿命。

(6)成本低、效益好。

二、强化地热气举钻井技术

随着时代的发展及人们对洁净能源的需求,我国将迎来地热开发的高潮期。地热钻井技术面对更大的挑战,如何把气举反循环钻井技术应用于地热深井钻进,形成特色生产力,提升现有回

转钻井的生产能力,具有重大的现实意义。

目前,虽然我国部分地区(如北京)开展了气举钻井工艺,但它是零星的、区域性的。要使这项技术走向全国,使之利用水平最大化,还需要有关人员、厂家等进一步研究与这项技术工艺配套的钻具、器具等,使之系列化、实用化,使科技转化为普遍的生产能力,服务于 21 世纪地热深井的钻探。

另外,加强以普通回转钻进为主、联合钻进为辅的多工艺钻井技术的组合使用与研究,如液动冲击回转、气动冲击回转等,强化复合工艺在同一钻进过程中的研究与使用,如液动冲击与井下动力的复合钻进,转盘回转与冲击器、井底动力的复合等。

第二节 钻井技术的发展趋势^[15]

回转钻井在 20 世纪初就已经问世。迄今它仍是勘察工业的最主要的钻井方法,在全世界被广泛采用。综观回转钻井的发展历程,在技术和装备上的明显进步,还是近 20 多年的事情。20 世纪 70 年代末期出现了 PDC 钻头,是一个明显进步的标志,随后便出现了快速发展的生动局面。进入 80 年代,相继出现了潜孔锤、随钻测量仪器、井下马达以及水平井钻井技术等。进入 90 年代,随钻测井及深井、超深井技术和复杂结构钻井技术得到迅速发展和应用。可以说钻井技术在最近 20 多年的发展日新月异。进入 21 世纪后,人类对“健康、安全、环保”的要求更加迫切,因此回转钻井在技术上的积极发展势头仍将迅猛。

一、钻井学科的特点

钻井是一项复杂的系统工程,涉及许多理论与技术问题。

(一)钻井力学

钻井工程中必然与地层岩石、井下钻柱和流体打交道。有关

力学问题具有特殊性和复杂性,无法直接从一般的力学知识中得到答案,客观上要求必须进行专门研究与解决。

1. 钻井岩石力学问题

以岩石力学基本理论和试验技术为基础,研究安全、快速钻进的岩石力学问题,主要研究内容包括:机械、水力破岩机理和规律,破岩工具的研制与选型依据等;模拟深部温压条件下的岩石强度、力学参数及流变特性等试验,井周岩石应力应变分析,实钻地层的破裂压力和坍塌压力的确定等。

2. 钻柱力学问题

综合应用基础科学的理论和方法,测试和分析各种钻井管材的性能(包括管材的物理性能、化学性能、力学参数及密封性能等),研究钻柱在各种井眼(直井、定向井及水平井)中的力学状态,如钻柱的稳定性、动态特性、整体受力及机械强度等,为钻柱的优化设计、合理使用及其寿命预测等提供了科学依据。

3. 钻井流体力学问题

1) 钻井环空流体力学问题

以流体力学为基础,主要研究钻井环空流体力学理论及钻井液携岩理论,不同流体(牛顿、宾汉、幂律)在环空中的流场分布,气、液、固三相或固、液两相在环空中的运移流动特性,不同井身结构中岩屑床的形成及运移规律等。

2) 钻头射流动力学问题

研究钻头处高压射流的破岩行为及井底流场,以及不同射流的研制机理与控制方法等。

(二)钻井化学

钻井液(完井液)及水泥浆的体系组成主要是复杂的化学问题。

以化学、黏土矿物学及地质学为基础理论,解决与钻井液(完井液)有关的生产实际问题,主要研究新型钻井液(完井液)的处理

剂、体系配方、流变性、废浆液处理以及计算机在钻井液(完井液)工程中的应用等。以满足各种复杂条件下钻井、成井工艺要求,实现安全、高速、优质钻井与成井。

(三)钻井工程地质学

由地质环境所决定的地层特性参数(包括地层的岩性、理化特性、地应力、压力特性、可钻性、各向异性及岩石力学参数等)是钻井优化设计与施工控制的基础数据。如何精确提取这些地层信息,是技术人员普遍关心的关键技术问题之一,直接关系到工程的质量、安全和效益。特别是钻遇高温、高压等复杂地层时,能否预先精确地掌握这些地层特性参数,甚至关系到工程的成败。

从现场可获取钻井(录井)、测井及测试等大量数据资料,其中隐含着丰富的地层信息。通过理论、实验及统计分析等,建立合理的物理模型及计算方法,以便利用现场信息资料,科学评估实钻地层的特性参数,为钻井工程的优化设计与控制提供科学依据。这种评估方法不仅对岩心的依赖性很小,既省钱省事,又能提高精度,而且能够建立起连续的实钻地层钻井特性剖面。

(四)钻井关键技术

1. 井眼轨迹控制技术

所谓井眼轨迹控制,就是采取合理措施(包括井下工具及测控系统等),强制钻头沿预置轨迹破碎地层而定向钻进的过程。钻头和地层的各向异性钻井特性及其相互作用特性,是影响实钻井眼轨迹的直接因素。如何充分认识、正确评估和合理利用所钻地层的各向异性钻井特性,如何正确预测分析随钻控制钻头对地层的作用力(它取决于钻柱的运动学和动力学特性),以及如何精确地监测实钻井眼轨迹等,都是井眼轨迹控制研究中的复杂科学与技术问题。从实际需要出发,研究与开发先进的井下工具、测控仪器及相应的软件系统,是解决井眼轨迹控制问题的关键所在。

2. 井眼稳定技术

以地层的理化特性和力学不稳定性评价为基础,通过钻井液体系的匹配、合理钻井液密度的确定及井身结构和钻井工艺的优化设计等综合技术措施,使井眼保持稳定,以避免或减少漏、涌、塌、卡等井下复杂情况和事故。

3. 高效破岩与洗井技术

这是提高机械钻速的关键技术,主要包括地层抗钻特性评价、钻头的研制或合理选型技术、高压射流破岩技术、水力与机械联合破岩技术、钻井参数优选技术,以及高效清洗与携带钻屑技术等。

4. 目的层保护技术

主要技术关键包括目的层快速诊断技术、针对目的层采用钻井液暂堵技术,以及采用欠平衡钻井技术等。

上述关键技术可总结为:“定向控制中靶点,井眼稳定保安全,高效破岩快速钻,储层保护效益见。”这些关键技术的理论基础是力学、化学和工程地质等,而它们的最终实现还必须借助于材料、动力、机械、测量、控制及信息等多学科专业的支撑作用,需要组织不同领域的科技人员协同攻关,进行广泛的多学科研究。

二、钻井技术的发展趋势

从现状和发展趋势来看,在进入 21 世纪后,回转钻井仍将是勘察工业最主要的钻井方法。回转钻井分为转盘回转钻井、井下动力钻井及二者兼备的复合回转钻井等不同的回转钻井方式。若是转盘回转钻井,则整个钻柱处于旋转运动状态,同时带动钻头回转钻进;若是井下动力钻井,则井下动力钻具的转子带动钻头回转钻进,转盘及整个钻柱可以不回转;若是复合回转钻井,则在使用井下动力钻具的同时,又开动转盘回转钻进。研究表明,

每一种回转钻井方式都具有各自不同的钻井特性和优缺点。其中,复合回转钻井方式在一定程度上兼备转盘钻和井下动力钻的优点,既可连续控制井眼轨迹和减少起下钻次数,同时还能提高机械钻速,是一种比较高效的可控钻井方式,今后应针对这种钻井方式的系统动力学特性进行研究与试验。

无论是哪种类型的钻井,还是采用哪种回转方式,都存在一个钻井效率问题,这也是钻井技术研究与发展的本质所在。影响钻井效率的主要问题,可归结为钻进的“间断”。目前造成“间断”的主要原因包括接单根、更换钻头和孔内钻具组合等、钻具失效、井眼失稳(漏、塌、喷、卡、阻)、纠斜作业、非随钻测量、达不到最优决策,以及多层次井身结构等。为了减少钻进“间断”,必须不断研究和提高钻井整体技术和装备水平,尤其是信息化、智能化及自动化钻井的技术研究与开发,需要不断加强。

在回转钻井领域一直处于领导地位的美国,为了保持其技术优势,1995年启动了一项重大的长期研究和开发计划,称为“国家先进的钻井与掘进技术”。前期的基础研究主要由政府率先资助作为催化剂,后期大规模的技术和产品研究与开发则主要靠工矿企业投入巨额资金。通过该项研究与开发,预期在岩石破碎(高效破岩)、井眼净化(洗井)及井眼稳定等方面有所革新,在钻头、岩石和井眼的测量与评价,以及定向控制等方面有所革命。该项计划的核心任务是要长期致力于研究与开发一种智能钻井系统。

面向21世纪,随着现代工业的高速发展,以及社会对资源需求量的不断增长,对探矿工程来讲,特别需要研究和开发先进适用的特殊工艺钻井技术,如高温高压流体的钻探与开发,研究和深井、超深井钻井技术。

(一) 高压高温钻井技术

按照国际通用概念,地温超过 150°C 称高温,地层压力当量密度超过 1.8 g/cm^3 或需用超过 70 MPa 井口装置时称高压,两者

同时具备的井称高压高温井。井底温度超过 220°C ，井底压力超过 105 MPa 称超高压高温井。高压高温井，特别是高压高温深井是钻井工程中难度最大，风险最高。因此，高压高温钻井技术是勘探开发过程中的关键技术内容，也是代表 21 世纪钻井技术发展水平的重要标志之一。

(二)特殊工艺钻井技术

特殊工艺钻井(见图 7-1)，主要包括定向井、水平井、丛式井、大位移井、复杂结构井、欠平衡钻井及套管钻井等，在世界范围内的研究与应用已经比较成熟，并且仍在深入研究与试验，以刷新技术指标。目前，我国已基本掌握了定向井、水平井及丛式井钻井技术，但对复杂结构井、大位移井及欠平衡钻井的研究仍比较薄弱。

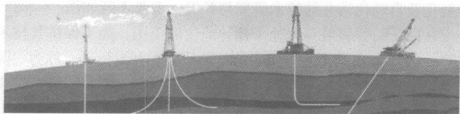


图 7-1 特殊工艺钻井示意图

大位移井是指水平位移与垂深之比大于等于 2 的定向井。钻大位移井的主要目的，就是通过大位移延伸实现对资源的高效勘探与开发。因此，大位移井钻井的关键技术指标是水平位移的大小。

复杂结构井，主要是指多分支井，可从一个主井筒内侧钻出若干个分支井筒，并且各分支井都是能重入和投产的井。如果各分支井都是水平井，则称为多分支水平井。

欠平衡钻井就是人为地使井内流体的有效流动压力低于地层孔隙压力的钻井方式。在钻进过程中允许地层流体进入井内，

循环出井，并在地面得到控制。欠平衡钻井有利于发现储层，避免对储层的损害，并且能提高机械钻速等。欠平衡钻井是一种高风险的钻井作业，容易引发井壁失稳和井喷事故，必须具有相应的套管程序和增加一整套地面控制装置，故所需费用一般较近平衡钻井高。目前，我们对欠平衡钻井的机理认识还不够深入。

套管钻井具有钻井与完井一体化的技术特征。应用套管钻井技术，不仅能有效地对付井下复杂情况，而且能够大幅度降低工程成本，提高勘探开发效益。据有关资料介绍，在复杂地质条件下采用套管钻井，可以节约建井工程费用 30% 以上。目前，套管钻井的技术难点主要集中在特制钻头、钻机匹配及特殊螺纹套管等方面。在我国，对套管钻井具有潜在的市场需求，但在技术方面几乎处于空白，亟须加强有关的技术研究与开发。

(三) 深井、超深井钻井

深井是指完钻井深为 4 500 ~ 6 000 m 的井，超深井是指完钻井深为 6 000 m 以上的井。深井、超深井钻井技术，是勘探和开发深部矿产资源必不可少的关键技术。进入 21 世纪，我国钻探工作将进一步加强，需要完成的深井、超深井比例将进一步增加。目前，我国在深井、超深井(主要是深探井)钻井方面的装备和技术水平，与美国相比还存在较大的差距。

(四) 三维可控与可视化钻井

实钻井眼轨迹通常是在复杂的三维地层空间中变化，直接看不见摸不着。如何有效地测量和控制实钻井眼的轨迹变化与稳定性等，甚至达到“看着打，随意打”的理想目标，是回转钻井向自动化和智能化方向发展的重要研究课题之一。经过不断的研究与发展，20 世纪 90 年代国内外就已经掌握了井下动力导向钻井系统及可变径稳定器等技术。同时，国外又进一步研制成功了回转导向钻井系统随钻地质导向技术。这些回转导向钻井系统，目

前主要是为了满足大位移等特殊工艺钻井的高技术需求。

三维震动成像技术进一步提高了油田的产出率。地质学家们利用这一技术朝地下发出震动声波,然后用计算机对返回的声波进行分析,推算对声波产生反射的地层结构特征及位置。这一技术可以用来确定广阔的未勘测地区地下岩石的构成特征。地质学家可以藉此估算出未开采资源的储量。这一技术也可以用在旧油田中寻找新的矿藏。有人说:“通过地质声波技术我们可以进入新的区域,描绘出更清晰的图像,并发现目前油田中未被开采的高压穴。这就像时光倒流,听那以前未曾听到过的音乐一样。”但三维地质成像不是一项新技术。此项技术自 1975 年就在石油行业出现,但直至 80 年代中期,还没有功能强大的计算机来处理勘测所产生的大量地球物理数据。计算机处理数据能力的提高改变了一切。如 1985 年时,分析 1 km 的地质探测数据需要 800 min 才能完成,现在同样的分析只要 10 min; 1980 年, 80 km² 勘测面积的分析成本为 800 万美元,现在大约为 9 万美元。技术的进步能将石油的开采量增高。与早期只能向下钻探的钻头不一样的,现代化的定向钻头可以从地质学家们认为的最理想的角度朝矿层钻进,而不需要考虑钻井路线如何迂回曲折。所谓的“边钻边测量技术”已使油井变成了高科技创造的奇迹。这种测量技术是在钻头后装上传感器和计算机处理器,这些电子装备可以连接互联网,使得地质学家们可以从数千里之外跟踪观测油井中钻探的情况。石油工业声称以上技术开创了一个“亲环境”钻探的新纪元。

利用计算机可视化技术,可以更好地理解大量井下测量数据(包括井眼轨迹参数、地层特性参数及近钻头力学参数等)及丛式井设计数据等,实现三维钻井的几何形态、地质状况及力学行为的“可视化”(见图 7-2),为三维钻井的优化控制提供信息可视化帮助。

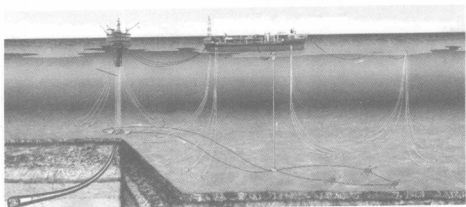


图 7-2 可控三维钻井示意图

总之，未来的钻井技术发展将继续以降低钻井直接成本为主要目标，以实现自动化钻井为核心研究内容，带动整个钻井技术的进步。钻井技术将更好地同地质、地震、测井和录井等专业技术紧密结合，形成一套高效的钻井系统，不断地提高钻井成功率和单井产量，缩短钻井时间，降低成本。

参 考 文 献

- [1] 刘志国, 等. 用 TSJ-1000 型水源钻机施工地热井. 探矿工程, 1998 (3)
- [2] 美国英格索兰公司. 水井钻探手册. 北京: 地质矿产部地质环境管理司, 1992
- [3] 陈庭根, 管志明. 钻井工程理论与技术. 山东: 石油大学出版社, 2002
- [4] 鄢捷年. 钻井液工艺学. 山东: 石油大学出版社, 2001
- [5] 钻井手册(甲方)编写组. 钻井手册(甲方). 北京: 石油工业出版社, 1990
- [6] 郭绍升. 钻探手册. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993
- [7] 董法治. 井斜新论. 北京: 地质出版社, 1996
- [8] 刘志国. 导管填砾法在千米地热井中的应用. 探矿工程, 1998 (5)
- [9] 刘瑞祺, 张长舟. 水文地质钻探钻井工程实用技术手册. 中国工程勘察协会技术咨询部, 1992
- [10] 刘志国. 贴砾过滤器在水井工程中的应用. 探矿工程(增刊), 2002
- [11] 张秋冬, 刘志国, 等. 煤系地层地热井钻探技术. 探矿工程(增刊), 2003
- [12] 刘志国. 地热钻井中对黏附卡钻的处理. 探矿工程, 1997 (4)
- [13] 谬谟圣. 美国石油钻井业百余年的发展情况探讨. 探矿工程, 1997 (4)
- [14] 刘志国. HTY 型单向阀的研制与应用效果. 探矿工程, 2003 (5)
- [15] 武汉地质学院. 钻探工艺学. 北京: 地质出版社, 1980
- [16] 姜仁. 钻井工程. 北京: 石油工业出版社, 1996
- [17] 国土资源部. 水文水井钻探工. 北京: 地质出版社, 1999
- [18] 李世忠. 钻探工艺学(下). 北京: 地质出版社, 1994
- [19] 王增根. 供水水文地质学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995
- [20] 铁道部第一勘探设计院. 地质钻探常用计算. 北京: 中国铁道出版社, 1985
- [21] 乌效鸣, 等. 钻井液与岩土工程浆液. 武汉: 中国地质大学出版社, 2002
- [22] 刘广志. 中国钻探科学技术史. 北京: 地质出版社, 1998

- [23] 第九届全国探矿工程学术会议论文集. 中国地质学会探矿工程专业委员会, 1997
- [24] 地质矿产部科学技术司. 探矿工程科技进行 100 例. 北京: 地质出版社, 1998
- [25] 中国地质学会探矿工程专业委员会. 贴砾滤水管在地热井中的应用. 探矿工程(增刊). 北京: 地质出版社, 1999
- [26] 高利德. 石油钻井的学科特点与技术展望. 探矿工程(增刊), 2003
- [27] 许刘万, 等. 水井气举钻探新技术推广应用. 探矿工程(增刊), 2003
- [28] 李安宁, 等. 北京地区地热井钻探技术. 探矿工程, 2001(5)
- [29] 郑树楼. 西安市地热井成井工艺分析. 探矿工程, 2001(5)
- [30] 赵长亮. 沾化地热井施工技术. 探矿工程, 2001(5)
- [31] 戴岳. 水井井用渗透性降低的原因及改善途径. 探矿工程, 1995(6)
- [32] 罗伟民. 第四系低温地热井施工工艺. 探矿工程, 1997(1)
- [33] 赵国珍, 等. 钻井力学基础. 北京: 石油工业出版社, 1988
- [34] 刘瑞祺. 钻井工程事故的预防与处理. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982
- [35] Vntukuri V.S., Lama R.D., Saluta S.S.. *Handbook on Mechanical properties of rocks*. V.1, 1974
- [36] Rokinson L.H.Jrn. *Effects of pore and confining pressure on failure characteristics of sedimentary rocks*. Tran. AIME, 216, 26 ~ 32, 1959
- [37] Black A.D., Green S.J.. *Laboratory simlation of deep well drilling*. Petr. Engineer, 50, 3, 41 ~ 48, 1978
- [38] Moore P.L.. *Drilling Practice Manual*. The Petroleum Publishing Co. Tulsa, 1974
- [39] Rehm.B., Meclendon R.K.. *Measurement of Formation Pressure From Drilling Data*. 1971, SPE 3601
- [40] API PR 7G, 7th Edition, 1976
- [41] Chilingarian G.V.. *Driling and Driling Fluids*. Elsevier Scientilic Publishing Company, 1981